

DESENVOLVIMENTO DE BOLORES EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

JOÃO PEDRO ERMIDA RESENDE BROCHADO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de
Almeida

PORTO, JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família, amigos e namorada, Maria

"Nada é uma realidade absoluta, tudo é permitido"

Vladimir Bartol

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não poderia ter sido concluída com sucesso não fosse o apoio e motivação dada ao longo da sua realização por parte de certas pessoas. Assim, quero manifestar os meus sentidos agradecimentos:

- À Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira, por me ter aceitado como orientando, guiando todo o meu trabalho ao longo do processo, mostrando-me a necessidade de empenho e dedicação para a realização desta dissertação.
- Ao Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, pelas horas despendidas e contribuição dadas a esta dissertação, assim como o constante apoio dado ao longo da elaboração de resultados e escrita.
- A toda a minha família, que me apoiou ao longo de todo o processo necessário para realizar com sucesso o curso, sendo que sem o seu esforço e dedicação nada disto seria possível.
- À minha namorada, Maria, pelo constante apoio, carinho, motivação e companhia demonstrados nos longos momentos de trabalho. Obrigado por me fazeres respirar fundo nos momentos de maior aperto e me ajudares a conseguir focar nos meus objetivos.
- Aos meus amigos e companheiros, por toda a amizade e horas passadas nestes anos, pelas longas noites de estudo e trabalho, e infindáveis memórias que por certo não irei esquecer.

A todos vós, o mais sincero obrigado.

RESUMO

A previsão de desenvolvimento de bolores desempenha um papel muito importante na física dos edifícios, uma vez que as crescentes preocupações relacionadas com o seu desempenho térmico e energético podem potenciar a ocorrência destas patologias, nomeadamente devido à maior estanquidade ao ar, promovendo assim as condições propícias para o aparecimento e crescimento de fungos e bolores. Torna-se portanto relevante avaliar as soluções construtivas de forma a evitar que o aparecimento de bolores ponha em causa não só a integridade do edifício mas também a saúde dos seus utilizadores.

Os modelos de previsão de desenvolvimento de bolores são assim ferramentas interessantes cuja correta aplicação pode ajudar a evitar a ocorrência de danos na edificação. No entanto, é fundamental conhecer os modelos, compreender as suas potencialidades e limitações e aprender a interpretar os seus resultados.

Assim, foi feita uma análise de sensibilidade dos dois modelos mais utilizados na previsão do desenvolvimento de bolores: o modelo VTT atualizado e o modelo biohigrotérmico. A metodologia adotada incluiu a variação de quatro parâmetros: clima interior, material de revestimento, orientação e existência de uma camada de isolamento térmico. A influência do clima interior foi avaliada através da simulação de 200 cenários previamente gerados com recurso ao método de Monte Carlo. Cada um dos cenários foi aplicado nos 12 casos de estudo analisados (3 revestimentos, 2 orientações e existência ou não de isolamento térmico), num total de 2400 simulações higrotérmicas. A partir dos resultados foi possível ter uma noção da influência que estes parâmetros têm no desenvolvimento de bolores.

Adicionalmente foi feita uma comparação entre os resultados produzidos por cada um dos modelos, procurando-se estabelecer uma correlação entre estes e comparando com outros resultados existentes na literatura.

Conclui-se que o clima interior tem, obviamente, um papel fundamental para o desenvolvimento de bolores, tendo-se também verificado que a escolha do material de revestimento é também muito relevante para o fenómeno. Tanto a orientação como a existência de uma camada de isolamento térmico são fatores que podem providenciar uma maior estabilidade às condições higrotérmicas interiores.

PALAVRAS-CHAVE: Comparação de modelos de previsão, modelo VTT atualizado, modelo biohigrotérmico e clima interior; bolores.

ABSTRACT

The prediction of mould development has gained an increasingly vital role in building physics as growing concerns related to its thermal performance and energy can enhance the occurrence of these pathologies, in particular due to increased air tightness, thus promoting conditions conducive for the emergence and growth of fungi and mould. It is therefore important to evaluate the constructive solutions in order to prevent the appearance of mould called into question not only because of the integrity of the building but also because of health issues of its users.

The mould prediction models are, due to this fact, interesting tools whose correct application can help prevent damage to the building. However, it is important to know the models, understand their strengths and limitations and learn to interpret their results.

Thus, a sensitivity analysis of the two most used models used in the prediction of mould growth was made: the VTT model and the biohygrothermal model. The methodology chosen included varying four parameters: indoor climate, coating material, orientation and the existence of a layer with thermal insulation characteristics. The influence of indoor climate was evaluated by simulating 200 scenarios previously generated using the Monte Carlo method. Each of the scenarios has been applied to the 12 cases of study analysed (3 coatings, 2 orientations and existence of thermal insulation), giving a total of 2400 hygrothermal simulations. From the results it was possible to get a sense of influence these parameters have on the development of mould.

Additionally a comparison between the results produced by each of the models was performed, attempting to establish a correlation between them and comparing results with existing literature.

In conclusion, the indoor climate has an obvious critical role in the development of mould, it has also been seen that the choice of coating material is very relevant to the phenomenon. The orientation and existence of a thermal insulation layer are factors that may provide greater stability to the indoor hygrothermal conditions.

KEYWORDS – Comparison of prediction models, VTT model, biohygrothermal model and indoor climate; mould.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XIII

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.3. ESTRUTURA	2

2. DESENVOLVIMENTO DE BOLORES E MODELOS DE PREVISÃO 3

2.1. BOLORES NA CONSTRUÇÃO	3
2.1.1. CONSEQUÊNCIAS DO CRESCIMENTO DE BOLOR E OS SEUS PERIGOS	3
2.1.2. CICLO DE VIDA	3
2.1.3. CONDIÇÕES PARA O CRESCIMENTO DE BOLOR	4
2.1.4. VALORES ADMISSÍVEIS PARA CONCENTRAÇÕES DE ESPOROS	4
2.2. MODELOS DE PREVISÃO DE CRESCIMENTO DE BOLOR	5
2.2.1. MODELO VTT	5
2.2.2. MODELO VTT ATUALIZADO	8
2.2.3. ISOPLETAS DE SEDLBAUER	9
2.2.4. MÉTODO GRÁFICO DE GERMINAÇÃO DE BOLOR DE MOON	12
2.2.5. MODELO BIOHIGROTÉRMICO	13
2.2.6. MODELO WUFI@-Bio	15
2.3. TRABALHOS REALIZADOS COM MODELOS DE PREVISÃO	17
2.3.1. MODELO VTT	17
2.3.2. MODELO BIOHIGROTÉRMICO	17
2.3.3. COMPARAÇÃO DE MODELOS	17

3. METODOLOGIA 19

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2. CASOS DE ESTUDO	19
3.3. GERAÇÃO DE CLIMAS INTERIORES	21
3.4. APLICAÇÃO DOS MODELOS	23
3.5. SELEÇÃO DOS CLIMAS MAIS E MENOS GRAVOSOS	25

4. RESULTADOS POR MODELO 29

4.1. DADOS DE ENTRADA NOS MODELOS VTT E BIOHIGROTÉRMICO	29
4.2. MODELO VTT ATUALIZADO	30

4.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA	30
4.2.2. RESULTADOS COM 4 CLIMAS.....	30
4.2.2.1. Material de revestimento	33
4.2.2.2. Existência de isolamento térmico.....	33
4.2.2.3. Orientação.....	34
4.2.3. AVALIAÇÃO DOS 200 CLIMAS	35
4.2.3.1. Materiais de revestimento	35
4.2.3.2. Existência de isolamento térmico.....	36
4.2.3.3. Orientação... ..	38
4.3. MODELO BIOHIGROTÉRMICO.....	38
4.3.1. NOTA INTRODUTÓRIA	38
4.3.2. RESULTADOS COM 4 CLIMAS.....	39
4.3.2.1. Material de revestimento	42
4.3.2.2. Existência de isolamento térmico.....	42
4.3.2.3. Orientação... ..	42
4.3.3. RESULTADOS COM 200 CLIMAS.....	42
4.3.3.1. Material de revestimento	42
4.3.3.2. Existência de isolamento térmico.....	44
4.3.3.3. Orientação.... ..	45
 5. COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS	 47
5.1. COMPARAÇÃO DE VALORES MÁXIMOS OBTIDOS.....	47
5.2. INSTANTE EM QUE OCORRE O VALOR MÁXIMO.....	50
 6. CONCLUSÕES	 55
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6.2. PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO	56
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 57

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Diagrama esquemático para a produção de um sistema de isopletras com o rácio de crescimento devido à temperatura e à humidade relativa respetivamente (adaptado de [2]).	11
Fig. 2.2 – Sistema de isopletras para germinação de esporos (esquerda) e crescimento micelial (direita) para classes de perigo A (a) e B/C (b) (adaptado [2]).	11
Fig. 2.3 – Sistema de isopletras para o tempo para a germinação de esporos (esquerda) e taxa de crescimento (direita) para categorias de substratos I (a) e II (b) (adaptado [2]).	12
Fig. 2.4 – Gráfico de germinação de bolor em grupos consoante a temperatura, humidade relativa e tempo de exposição necessário para iniciação de germinação de bolor (adaptado [1]).	12
Fig. 2.5 Diagrama esquemático da ideia modelo para os processos de crescimento dependentes do substrato de acordo com as variadas fases (esquerda) e diagrama esquemático da curva de crescimento de uma cultura de bolor (adaptado de [2]).	14
Fig. 2.6 - Comparação das diferentes aproximações feitas para a ideia final (esporo no modelo biohigrotérmico) no modelo biohigrotérmico (adaptado de [2]).	15
Fig. 2.7 – Introdução de humidade relativa inicial e substrato pretendido no programa WUFI®-Bio...	16
Fig. 2.8 – Introdução de climas para simulação higrotérmica no WUFI®-Bio	16
Fig. 2.9 – Comparação entre Mould Index e crescimento de bolor, através de uma função polinomial com correção BET (adaptado de [24]).	18
Fig. 3.1 – Método de simulação de Monte Carlo para três parâmetros de entrada e um de saída (adaptado de [29]).	22
Fig. 3.2 - Amostras aleatórias pelo método Hipercubo Latino (adaptado de [30]).	22
Fig. 3.3 – Resultados gráficos da variação da temperatura (a) e humidade relativa (b) dos 200 climas gerados ao longo do tempo, em comparação com o clima base.	23
Fig. 3.4 – Modelo esquemático da metodologia	24
Fig. 3.5 – Clima base	26
Fig. 3.6 – Clima 72	27
Fig. 3.7 – Clima 88	27
Fig. 3.8 – Clima 176	27
Fig. 4.1 – Temperatura e humidade relativa superficiais no elemento construtivo revestido com reboco de gesso, com orientação norte e sem isolamento (Caso 1): a) clima 72; b) clima base.	29
Fig. 4.2 – Comparação da humidade relativa superficial de dois climas (clima 88 e clima 176) para dois casos com e sem isolamento (Caso 5 e caso 11)	34
Fig. 4.3 - Comparação da temperatura superficial de dois climas (clima 88 e clima 176) para dois casos com e sem isolamento (Caso 5 e caso 11)	34
Fig. 4.4 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento e orientação norte variando o material.	35
Fig. 4.5 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento e orientação sul variando o material.	35
Fig. 4.6 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento e orientação norte variando o material.	36
Fig. 4.7 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento e orientação sul variando o material.	36
Fig. 4.8 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com orientação norte variando a existência de isolamento.	37
Fig. 4.9 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com orientação sul variando a existência de isolamento.	37

Fig. 4.10 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento variando a orientação.....	38
Fig. 4.11 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento variando a orientação.....	38
Fig. 4.12 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos sem isolamento e orientação norte variando o material.....	43
Fig. 4.13 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos sem isolamento e orientação sul variando o material.	43
Fig. 4.14 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com isolamento e orientação norte variando o material.....	43
Fig. 4.15 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com isolamento e orientação sul variando o material.	44
Fig. 4.16 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com orientação norte variando a existência de isolamento.	44
Fig. 4.17 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com orientação sul variando a existência de isolamento.	45
Fig. 4.18 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos sem isolamento variando a orientação.....	45
Fig. 4.19 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com isolamento variando a orientação.....	46
Fig. 5.1 – Correspondência dos resultados máximos de ambos os modelos para os 200 climas.	47
Fig. 5.2 – Mould Index previsto para as diferentes classes de sensibilidade para condições constantes de 22°C e humidade relativa de 97%. (adaptado de [31]).	48
Fig. 5.3 - Correspondência dos resultados máximos de ambos os modelos para os 200 climas, juntamente com as linhas de tendência obtidas e a linha de tendência estabelecida por Krus et al. [24].	49
Fig. 5.4 – Instantes em que ocorrem os valores máximos de Mould Index de acordo com o modelo VTT atualizado.	50
Fig. 5.5 – Instantes em que ocorrem os máximos valores do crescimento de acordo com o modelo biohigrotérmico.	51
Fig. 5.6 – Instantes em que ocorrem os valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento térmico.	52
Fig. 5.7 – Instantes em que ocorrem os valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento.	52
Fig. 5.8 – Instantes em que ocorrem os valores máximos do crescimento para os casos sem isolamento.	53
Fig. 5.9 – Instantes em que ocorrem os valores máximos do crescimento para os casos com isolamento.	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Condições específicas para verificação da conformidade de bolors com base na perigosidade das diferentes espécies (adaptado de [11]).	5
Tabela 2.2 - Classificação original de Mould Index com atualização baseada em novos ensaios (negrito) (adaptado de [6, 7]).....	6
Tabela 2.3 – Valores de k1, A, B e C consoante a classe de sensibilidade	9
Tabela 2.4 – Exemplo da aplicação do método gráfico de germinação de bolor (“x” indica que não há crescimento de bolor e “o” indica que há risco de germinação de bolor) (adaptado de [1]).....	13
Tabela 3.1 – Casos de estudo	20
Tabela 3.2 – Materiais utilizados e as suas especificações	21
Tabela 3.3 – Classes e tipos de substrato	21
Tabela 3.4 – Valores máximos de crescimento e Mould Index e respetivos climas.....	25
Tabela 3.5 – Climas que originaram valores médios máximos e mínimos da temperatura e da humidade relativa superficial.....	26
Tabela 4.1 – Esquema de símbolos e cores adotado na interpretação dos resultados.	30

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

e – Espessura [m]

γ – Densidade [kg/m^3]

ξ – Porosidade [m^3/m^3]

C – Capacidade térmica específica, seco [J/kgK]

λ – coeficiente de transmissão térmica do material [$\text{W}/\text{m.K}$]

U – coeficiente de transmissão térmica [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]

μ – Fator de resistência ao vapor de água [-]

θ – Temperatura

t_m – Tempo em semanas

c_{material} – Coeficiente de declínio

fr – função de recuperação

fT – função temperatura

HR – Humidade relativa (%)

k – fator que define a taxa de crescimento de fungos

M – Mould Index

W – Espécie de madeira

SQ – Qualidade da superfície

R^2 – coeficiente de determinação

Fig. – Figura

Max – Máximo

Min - Mínimo

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de modelos de previsão de desenvolvimento de bolores torna-se cada vez mais indispensável para avaliar o comportamento higrotérmico de edifícios. A crescente preocupação com eficiência energética tem levado, cada vez mais, a um maior controlo das condições interiores. No entanto, apesar de positivo em termos de conforto e eficiência energética, este fenómeno, por potenciar o recurso a edifícios com elevada estanquidade ao ar, pode promover o desenvolvimento de bolores, pondo em causa a saúde dos seus utentes, contribuindo para o aparecimento de sintomas de asma e/ou infeções respiratórias. Também a vertente visual e íntegra de edifícios é posta em causa, uma vez que estes irão provocar a deterioração dos materiais usados nas disposições construtivas.

Torna-se portanto fundamental fazer uma análise das condições ambientais que propiciam o desenvolvimento de bolores, tais como a temperatura, humidade relativa, tempo de exposição, nutrientes presentes no substrato entre outras. Estas poderão ser controladas através de uma seleção de materiais adequada às condições a que posteriormente estes estarão expostos.

Assim a utilização de modelos de previsão do desenvolvimento de bolores pode e deve contribuir para uma escolha sustentada das melhores soluções construtivas, contribuindo para o bem-estar dos utilizadores dos edifícios e evitando também o aparecimento de danos com consequências económicas por vezes bastante significativas. No entanto, é fundamental conhecer os modelos, compreender as suas potencialidades e limitações e aprender a interpretar os seus resultados.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Existem vários modelos de previsão de desenvolvimento de bolor. Assim estabeleceu-se como objetivo principal deste trabalho analisar os resultados obtidos com dois modelos de previsão diferentes (modelo VTT atualizado e modelo biohigrotérmico), aplicando o clima exterior do Porto e utilizando para o interior 200 climas simulados. Também se verificou a influência no desenvolvimento de bolores de parâmetros como o tipo de revestimento, a orientação e a existência de uma camada de isolamento térmico. A partir dos resultados foi possível fazer uma comparação entre estes modelos. Estabeleceram-se assim etapas para a elaboração desta dissertação:

- Pesquisa e descrição de modelos de previsão existentes;
- Aplicação do método de Monte Carlo para gerar os 200 climas interiores;
- Elaboração de previsões de desenvolvimento de bolor com base nos dois modelos escolhidos para análise;

- Análise aos resultados obtidos para cada modelo, avaliando a influência que o substrato, a orientação e a existência de isolamento térmico têm no crescimento de bolores;
- Comparação dos resultados obtidos para cada modelo, estabelecendo, caso seja possível, uma possível relação direta entre o modelo VTT atualizado e o modelo biohigrotérmico.

1.3. ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em seis capítulos.

Capítulo 1 – Considerações iniciais e definição dos objetivos. Neste capítulo aborda-se a motivação que levou à elaboração deste trabalho, fazendo uma abordagem explicativa do desenvolvimento de bolores e possíveis consequências.

Capítulo 2 – Estado de arte. Faz-se uma análise às condições que poderão potenciar o desenvolvimento de bolores, verificando os valores estabelecidos como limites. Posteriormente analisam-se os modelos escolhidos previamente, fazendo um levantamento de toda a informação que possibilita o seu uso. É também feita uma pesquisa de trabalhos realizados com estes modelos no âmbito de aperfeiçoamento e verificação de resultados para outros parâmetros.

Capítulo 3 – Metodologia. Neste capítulo explica-se a metodologia adotada na seleção dos casos de estudo e na criação dos climas interiores. Descreve-se a utilização dos programas WUFI® Pro 5.2 e WUFI®-Bio (modelo biohigrotérmico e o desenvolvimento de uma folha de cálculo para a solução dos sistemas de equações necessários para o modelo VTT atualizado.

Capítulo 4 – Resultados por modelo. Nesta parte da dissertação é feita uma análise aos resultados obtidos para cada modelo, de forma a poder verificar a influência dos parâmetros que foram variados (material de revestimento, orientação e existência de isolamento), fazendo uma discussão da sensibilidade dos modelos.

Capítulo 5 – Comparação entre modelos. É feita a análise separadamente de cada modelo, seguindo-se a comparação dos resultados, aplicando para isso os mesmos climas e disposições construtivas. Deste modo, procede-se à comparação dos valores obtidos e possível equiparação entre estes. Uma vez mais é analisada a influência da variação dos parâmetros, considerados como chave para o desenvolvimento de bolores.

Capítulo 6 – Conclusão. Neste último capítulo são abordadas as considerações finais e principais conclusões retiradas desta dissertação, apresentando propostas para trabalhos futuros no seguimento da abordagem adotada.

2

DESENVOLVIMENTO DE BOLORES E MODELOS DE PREVISÃO

2.1. BOLORES NA CONSTRUÇÃO

O crescimento de bolores no interior dos edifícios é um problema bastante recorrente. Adicionalmente, as crescentes preocupações relacionadas com a eficiência energética dos edifícios têm conduzido a edifícios mais estanques, providenciando assim um meio favorável ao seu desenvolvimento. Este não é o único fator recente a ter em conta, uma vez que cada vez mais surgem novos materiais que são aplicados na construção com resultados desfavoráveis para a contenção do crescimento de bolores [1]. Assim surge a necessidade de minimizar e controlar este problema, garantindo as condições de salubridade exigidas a um edifício. Para tal, é necessário compreender o que é o bolor e quais os fatores que potenciam o seu desenvolvimento.

2.1.1. CONSEQUÊNCIAS DO CRESCIMENTO DE BOLOR E OS SEUS PERIGOS

Já foram realizados vários estudos que permitiram concluir que o desenvolvimento de bolores provoca não só problemas no que toca à durabilidade e eficiência dos materiais como também problemas relacionados com a saúde. De acordo com Sedlbauer e Moon [1, 2], o desenvolvimento de fungos e bolores pode levar ao aparecimento de infeções respiratórias, asma, alergias e tosse entre outras devido à produção de mico toxinas que são consideradas tóxicas para os ocupantes dos edifícios [3]. Em relação ao edifício o desenvolvimento de bolor é visto com grande preocupação uma vez que pode levar à sua deterioração, podendo causar danos estruturais, condicionando a performance de certos materiais. Alguns dos problemas mais importantes relacionados com a humidade e bolor destacados por Moon [1] são o destacamento dos acabamentos das fachadas, a deterioração de materiais de construção, a redução da eficácia do isolamento térmico e a corrosão de elementos em metal.

2.1.2. CICLO DE VIDA

Ainda que existam mais de 65,000 espécies de bolor identificadas, aquelas que são mais comuns nos edifícios apresentam um ciclo de vida idêntico [4], constituído por quatro fases: fixação dos esporos, germinação, crescimento das hifas e reprodução. No que toca ao setor das construções o crescimento de bolor é definido em estados visíveis e não visíveis sendo feita a sua caracterização de acordo com índices. Houve no entanto algumas variações nas descrições dos índices previamente estabelecidos por Adan [5] sendo assim atualizado a tabela de Mould Index após ensaios elaborados por Viitanen et al. [6, 7], inserindo a visualização de bolor através do microscópio (Tabela 2.2). Tendo em conta o seu ciclo de vida é possível concluir que sendo feito um controlo das condições do ambiente em que este se

desenvolve, o crescimento de bolor pode ser evitado de forma a reduzir ou até eliminar a sua proliferação. Estas condições serão descritas no subcapítulo seguinte.

2.1.3. CONDIÇÕES PARA O CRESCIMENTO DE BOLOR

Para que haja uma proliferação do bolor são necessárias certas condições que promovam o seu crescimento, condições estas que variam de acordo com a espécie. No entanto, as semelhanças entre espécies permite um agrupamento em classes. São necessárias condições para que o bolor seja capaz de germinar, crescer e fazer a criação de esporos, para isso é necessário que os esporos seja capazes de se acomodar na superfície e que esta tenha os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, também é necessária uma temperatura e valores de oxigénio apropriados e finalmente uma atividade de água ou humidade nos parâmetros também eles propícios ao crescimento de bolor. [1, 8]. Claro está que não são apenas estes fatores que contribuem para o seu desenvolvimento, tendo no entanto um papel principal. Krus e Sedlbauer realizaram também estudos amplos acerca da influência destes fatores admitindo que haveriam outros que influenciariam o crescimento de bolor. São estes o valor de pH, a luz, a rugosidade da superfície, as interações bióticas e o tempo de exposição [9].

2.1.4. VALORES ADEQUADOS PARA CONCENTRAÇÕES DE ESPOROS

Rao [10] fez uma revisão de todas as normas relacionadas com o controlo de concentrações de esporos, referindo que segundo a “World Health Organization” (WHO) não é aceitável a presença de qualquer espécie de fungo que seja tóxica ou patogénica dentro de um edifício. Algumas organizações estabelecem valores limite de concentração sob a forma de “Colony forming units” (CFU) ou seja concentração de esporos por metro cúbico (m^3). Para um misto de várias espécies, o valor máximo estabelecido foi de 500 CFU/ m^3 , sendo diminuído para 150 CFU/ m^3 quando de uma só espécie se trata [10]. Na regulamentação portuguesa os valores limite estão estabelecidos na portaria N353/2013, no artigo 2º, ponto 4.2.3 (Tabela 2.1) [11].

Tabela 2.1 - Condições específicas para verificação da conformidade de bolores com base na perigosidade das diferentes espécies (adaptado de [11]).

Espécies	Condições específicas de conformidade
Espécies comuns (excluindo as produtoras de toxinas)	Cladosporium spp
	Penicillium spp
	Aspergillus spp
	Alternaria spp
	Eurotium spp
	Paecilomyces spp
	Wallemia spp
Espécies pouco comuns	Acremonium spp
	Chrysosporium spp
	Tricothecium spp
	Curvularia spp
	Nigrospora spp
Espécies patogénicas	Chytridiomycota
	Histoplasma capsulatum
	Blastomyces dermatitidis
	Coccidioides immitis
Espécies toxinogénicas	Stachybotrys chartarum
	Aspergillus versicolor
	Aspergillus flavus
	Aspergillus ochraceus
	Aspergillus terreus
	Aspergillus fumigatus
	Fusarium moniliforme
	Fusarium culmorum
	Trichoderma viride

2.2. MODELOS DE PREVISÃO DE CRESCIMENTO DE BOLOR

2.2.1. MODELO VTT

O modelo VTT foi desenvolvido por Hukka e Viitanen [12], com base em dados previamente recolhidos em laboratório. Este modelo avalia e quantifica o crescimento de bolor através de um Mould Index (M)

(Tabela 2.2), com valores que segundo estes autores pode variar entre 0 e 6. De acordo com este modelo, um valor do Mould Index igual a 1 ($M=1$) corresponde ao início do processo de germinação e, portanto, é considerado como o valor máximo tolerável. Este modelo foi desenvolvido a partir de ensaios laboratoriais com a madeira de pinheiros e de abetos, obtendo diferentes resultados de acordo com a temperatura e humidade relativa do ar, com o tempo de exposição e com a superfície onde se está a avaliar o risco de crescimento.

Tabela 2.2 - Classificação original de Mould Index com atualização baseada em novos ensaios (negrito) (adaptado de [5-7]).

Mould Index	Rácio de crescimento	Descrição		
0	Não há crescimento de bolor	Esporos não ativados		
1	Pequenas quantidades de bolor na superfície (<1%)	Fases iniciais do crescimento	Microscopicamente visível	Visivelmente detetável
2	<10% da superfície coberta de bolor			
3	10-30% da superfície coberta de bolor ou <50% visto ao microscópio	Produção de novos esporos		
4	30-70% da superfície coberta de bolor ou >50% visto ao microscópio	Crescimento moderado	Microscopicamente visível	Visivelmente detetável
5	>70% da superfície coberta de bolor	Crescimento acentuado		
6	Superfície completa ou quase completamente coberta de bolor	Cobertura de quase 100% da superfície		

O modelo VTT define o valor da humidade relativa mínima ($RH_{critico}$) para o qual se prevê o início do desenvolvimento de bolor, desde que ocorra uma exposição suficientemente longa, segundo a fórmula seguinte:

$$RH_{critico} = \begin{cases} -0.00267\theta^3 + 0.160\theta^2 - 3.13\theta + 100, & \theta < 20^\circ C \\ HR_{min}, & \theta \geq 20^\circ C \end{cases} \quad (2.1)$$

No caso de materiais de madeira o valor de RH_{min} é de 80%.

A variação temporal do valor do Mould Index foi traduzida numa equação diferencial:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{k_1 \times k_2}{7 \times t_{M=1}} \quad (2.2)$$

O parâmetro k_1 define o crescimento de bolor quando este se encontra sujeito a condições favoráveis com base na seguinte equação:

$$k_1 = \begin{cases} 1, & M < 1 \\ \frac{2}{\frac{t_{M=3}}{t_{M=1}} - 1}, & M > 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

Os valores de $t_{M=1}$ e $t_{M=3}$ correspondem, respetivamente, ao tempo em semanas para que seja atingido o valor de Mould Index de 1, que representa o início do crescimento do bolor, e 3, que representa o valor no qual é possível observar a primeira aparição do bolor no seu processo de crescimento ($M=1$ e $M=3$). Estes valores também podem ser obtidos a partir de equações determinadas empiricamente sob a seguinte forma:

$$\begin{cases} t_{M=1} = e^{(-0.68 \times \text{LN}(\theta) - 13.9 \times \text{LN}(\text{RH}) + 0.14 \times W - 0.33 \times SQ + 66.02)} \\ t_{M=3} = e^{(-0.74 \times \text{LN}(\theta) - 12.72 \times \text{LN}(\text{RH}) + 0.06 \times W + 61.50)} \end{cases} \quad (2.4)$$

Com W em função da espécie de madeira utilizada, a tomar os valores de 0 para o pinheiro e 1 para o abeto, e SQ a variar com a natureza da superfície, também com valores entre 0 e 1.

O valor de k_2 é aplicado de forma a fazer uma moderação no crescimento do Mould Index quando este apresenta valores dentro do intervalo $4 < M < 6$, sendo variável de acordo com a seguinte equação e com o valor de $M_{\text{máximo}}$ também estabelecido em baixo:

$$k_2 = \max[1 - e^{(2.3(M - M_{\text{máximo}}))}; 0] \quad (2.5)$$

$$M_{\text{máximo}} = 1 + 7 \times \frac{HR_{\text{crítica}} - HR}{HR_{\text{crítica}} - 100} - 2 \times \left(\frac{HR_{\text{crítica}} - HR}{HR_{\text{crítica}} - 100} \right)^2 \quad (2.6)$$

Faça-se notar que este modelo está também dotado de um sistema que permite quantificar, aproximadamente, reduções no valor do Mould Index quando este está exposto a condições desfavoráveis de acordo com a seguinte formulação:

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0.00133, & t - t_1 < 6h \\ 0, & 6 < t - t_1 \leq 24h \\ -0.000667, & t - t_1 > 24h \end{cases} \quad (2.7)$$

Sendo $t - t_1$, o tempo em horas a que o substrato está exposto a condições desfavoráveis. No entanto a equação 2.7 está baseada num pequeno número de ensaios, não tendo sido testada para períodos maiores a 14 dias ou para temperaturas abaixo de 0°C [13]. A introdução desta equação para atraso no desenvolvimento foi introduzida, pois os ciclos de humidade relativa propícios repetiam-se, fenómeno este que levaria a uma grande atividade de bolor. De forma a considerar um decréscimo no desenvolvimento do bolor em períodos de seca, introduz-se o atraso dado na forma de uma equação (eq.

2.7). Claro está que embora se considere atrasos no seu desenvolvimento, o bolor não sofrerá qualquer alteração a nível visual

2.2.2. MODELO VTT ATUALIZADO

Com a necessidade de aplicar este modelo a outros materiais que não a madeira, foram feitos ensaios que permitissem relacionar o desenvolvimento do Mould Index noutros substratos com os resultados obtidos com o modelo VTT original [7]. Uma vez que elaborar uma adaptação para todos os tipos de materiais não é realista, foram estabelecidas quatro classes: muito sensível, sensível, resistência média e resistente. Para todas estas classes são utilizados os valores de W e SQ do pinheiro (0), tendo também a tabela de Mould Index sofrido algumas alterações de forma a uma melhor adaptação a esta nova gama de materiais (Tabela 2.3). Assim as diferenças para o modelo original passaram pela alteração do valor de humidade relativa mínima ($HR_{mínimo}$) de 80% para 85%, o valor de k_1 (eq. 2.8) foi adaptado e na fórmula para obtenção do Mould Index máximo ($M_{máximo}$) foram introduzidas três constantes, denominadas de A, B e C (eq. 2.9).

$$k_1 = \begin{cases} \frac{t_{M=1,pinheiro}}{t_{M=1}}, & M < 1 \\ \frac{2 \times (t_{M=3,pinheiro} - t_{M=1,pinheiro})}{(t_{M=3} - t_{M=1})}, & M > 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$M_{máximo} = A + B \times \frac{HR_{crítica} - HR}{HR_{crítica} - 100} - C \times \left(\frac{HR_{crítica} - HR}{HR_{crítica} - 100} \right)^2 \quad (2.9)$$

As variáveis $t_{M=1,pinheiro}$ e $t_{M=3,pinheiro}$ correspondem, respetivamente, ao tempo até que ocorra o início do processo de germinação e aos primeiros indícios visuais na madeira de pinheiro. Uma vez que os valores de k_1 , A, B e C variam também de material para material, estabeleceram-se valores médios obtidos a partir de vários ensaios (Tabela 2.3).

Uma vez que o material utilizado também vai influenciar o decréscimo no crescimento do bolor é aplicado um coeficiente de declínio ($c_{material}$), que varia consoante a classe de material em questão, com valores de 1; 0,5; 0,25 e 0,1 para as classes de muito sensível, sensível, resistência média e resistente, respetivamente. Este coeficiente é aplicado diretamente na determinação do Mould Index de acordo com a seguinte formulação:

$$\left(\frac{dM}{dt} \right)_{material} = c_{material} \left(\frac{dM}{dt} \right)_{pinheiro} \quad (2.10)$$

Tabela 2.3 – Valores de k1, A, B e C consoante a classe de sensibilidade

Classe de sensibilidade	Grupos de materiais	k1 (M<1)	k1 (M>1)	Mmáximo (Influência k2)			RHmin (%)
				A	B	C	
Muito sensível	Madeiras não tratadas; incluem muitos nutrientes para o crescimento biológico	1	2	1	7	2	80
Sensível	Madeira plana; produtos com camada de papel, produtos com base em madeira	0,578	0,386	0,3	6	1	80
Resistência média	Cimento ou produtos baseados em plástico, fibras minerais	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Resistente	Vidro e produtos metálicos, materiais com tratamentos protetivos	0,033	0,014	0	3	1	85

2.2.3. ISOPLETAS DE SEDLBAUER

Vários modelos de isopletas foram propostos ao longo dos anos, no entanto estas estavam determinadas apenas para um conjunto de espécies assim como para um limitado número de materiais em que se desenvolviam. Sedlbauer [2], de forma a incluir o maior número possível de espécies de bolor e materiais, agrupou-os em classes. Para tal, optou por separar as espécies de bolor de acordo com o risco para a saúde em concordância com Warscheid e baseando-se nas propostas feitas pela “Regional Public Health Department” (LGA) Stuttgart [2], obtendo as seguintes classes:

- Classe A: Bolors ou os seus produtos metabólicos são altamente patogénicos, a sua ocorrência em habitações não é permitida;
- Classe B: Bolors ou os seus produtos metabólicos são patogénicos quando expostos durante um longo período de tempo. Podem causar reações alérgicas;
- Classe C: Bolors que não são perigosos para a saúde. A sua formação pode causar danos económicos.

Uma vez que os valores das classes B e C variam apenas ligeiramente estas foram combinadas criando a classe B/C, bastando então distinguir entre classe A e classe B/C.

Este também elaborou um sistema de classificação para os substratos onde se desenvolvem os bolors, são estes:

- Categoria 0: Meio de cultura ótima;
- Categoria I: Materiais de construção biologicamente recicláveis;

- Categoria II: Materiais de construção com uma estrutura porosa;
- Categoria III: Materiais de construção não degradáveis e sem qualquer tipo de nutriente.

Os sistemas de isopletas foram desenvolvidos numa perspetiva conservadora, considerando as condições ótimas para desenvolvimento das espécies de bolor e a menor humidade relativa necessária para deixar o bolor crescer dependendo da temperatura.

Para a produção de um sistema de isopletas, Sedlbauer propôs que se utilizasse a relação do rácio de crescimento micelial (mm/d) com a temperatura e a humidade relativa. Com base nestas dependências gerou um nomograma (Fig. 2.1), que seguindo certos passos nos permite obter um sistema de isopletas. Abaixo está exposto um exemplo elaborado tendo em conta os rácios de crescimento, para espécies singulares de bolor, para determinadas condições de temperatura e humidade relativa:

- Passo 1: Ler o crescimento em função de uma determinada humidade relativa obtendo o ponto 1;
- Passo 2: Retirar um valor de temperatura ideal para o seu desenvolvimento (2a). Faz-se a intersecção do valor de temperatura ideal e da humidade relativa do passo 1, obtendo o valor 2b;
- Passo 3: Lê-se os valores da temperatura com que ocorre o crescimento definido no passo 1, de forma a retirar os pontos 3a e 3b;
- Passo 4: Retira-se o valor ótimo para o crescimento da humidade relativa, denominado de ponto 4;
- Passo 5: Faz-se a intersecção do ponto 4 com os pontos 3a e 3b de forma a obter os pontos 5a e 5b;
- Passo 6: Quando obtidos estes três pontos (2b, 5a e 5b), liga-se pela função de cosseno hiperbólico de forma a gerar a isopleta que nos dá combinação de temperatura/humidade relativa necessária para que ocorra determinado rácio de crescimento por dia.

Desta forma vão ser realizadas oito sistemas de isopletas, resultado de duas classes de perigo (A e B/C), duas categorias de substratos (I e II). Para cada um destes sistemas vão ser realizadas isopletas com o tempo para que ocorra a germinação de esporos e com os valores diários de crescimento micelial. Nestas vai estar representada a isolinha mais baixa, denominada de LIM (Lowest Isopleth for Mould), que estabelece o limite de condições mínimas para o desenvolvimento biológico. Valores que se reúnam abaixo da LIM vão representar a falta de atividade. Para a categoria III não é desenvolvido um sistema de isopletas, uma vez que não se espera que haja crescimento neste tipo de materiais. Em caso de contaminação deve-se optar sempre pela categoria I.

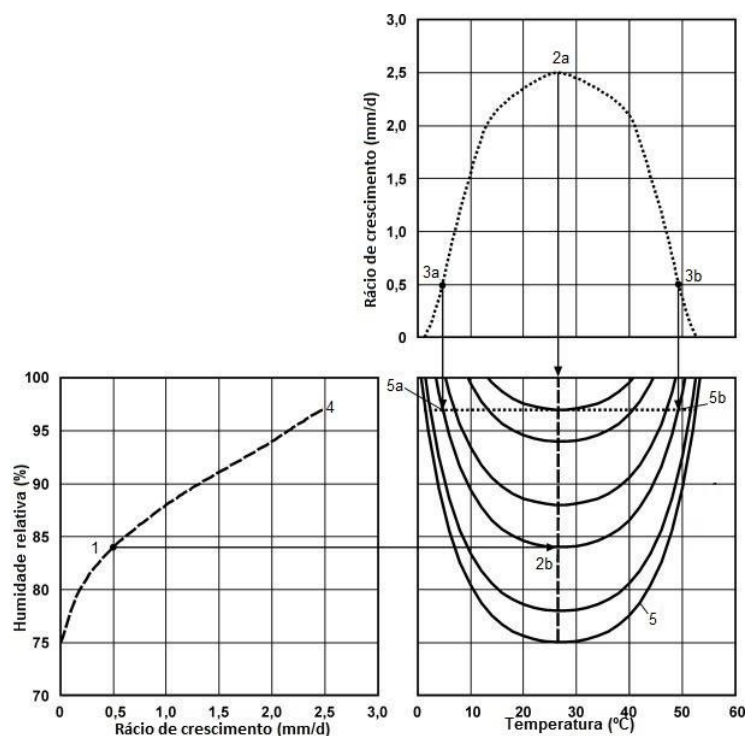


Fig. 2.1 – Diagrama esquemático para a produção de um sistema de isopletras com o rácio de crescimento devido à temperatura e à humidade relativa respetivamente (adaptado de [2]).

Os oito sistemas de isopletras desenvolvidos por Sedlbauer são:

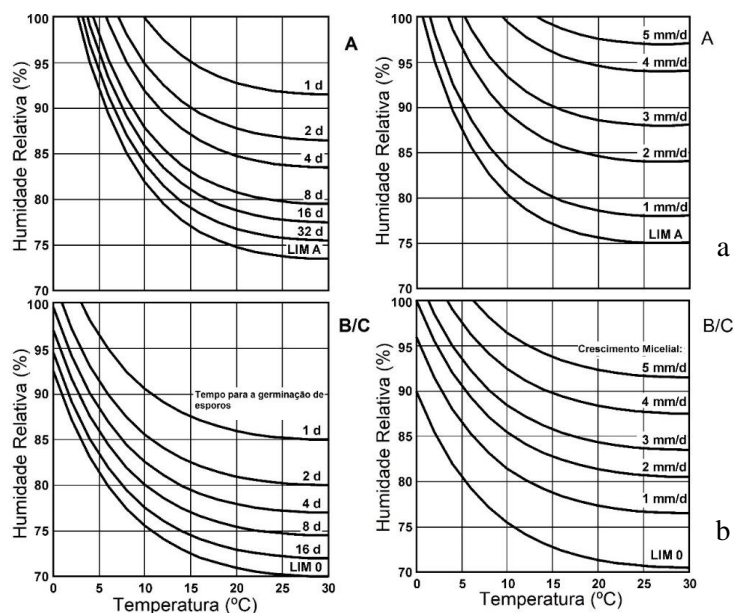


Fig. 2.2 – Sistema de isopletras para germinação de esporos (esquerda) e crescimento micelial (direita) para classes de perigo A (a) e B/C (b) (adaptado [2]).

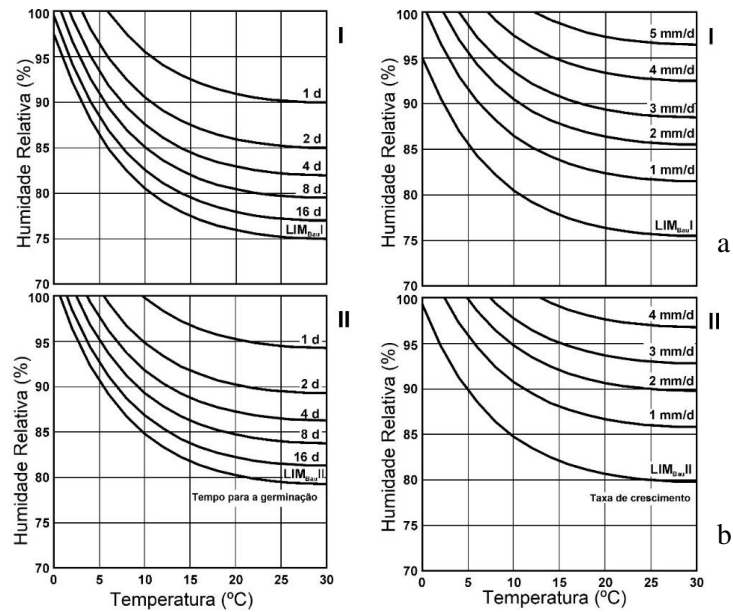


Fig. 2.3 – Sistema de isopletas para o tempo para a germinação de esporos (esquerda) e taxa de crescimento (direita) para categorias de substratos I (a) e II (b) (adaptado [2]).

2.2.4. MÉTODO GRÁFICO DE GERMINAÇÃO DE BOLOR DE MOON

Moon [1] estabeleceu o método gráfico de germinação de bolor para colmatar a incapacidade de se aplicar as isopletas para condições variáveis de temperatura e humidade relativa ao longo do tempo. Este método utiliza os sistemas de isopletas adicionando-lhe a duração acumulada em dias de exposição a uma determinada combinação de temperatura e humidade relativa (Fig. 2.2 e Fig. 2.3). A metodologia prevê seis zonas com diferentes durações para o período de exposição consecutiva. Caso o tempo de exposição consecutiva seja igual ou superior ao mínimo de uma determinada zona considera-se que existe risco de crescimento de bolor.

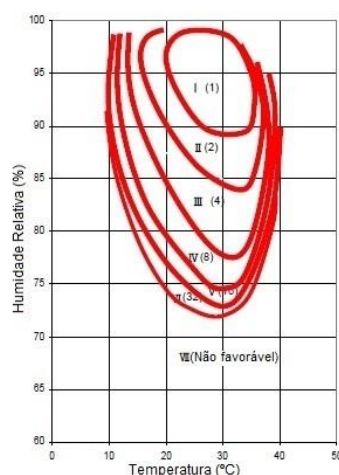


Fig. 2.4 – Gráfico de germinação de bolor em grupos consoante a temperatura, humidade relativa e tempo de exposição necessário para iniciação de germinação de bolor (adaptado [1]).

Tabela 2.4 – Exemplo da aplicação do método gráfico de germinação de bolor (“x” indica que não há crescimento de bolor e “o” indica que há risco de germinação de bolor) (adaptado de [1]).

Dia	Superfície		Grupo	Tempo de exposição acumulado	Tempo de exposição requerido	Risco de crescimento de bolor	
	Temperatura	Humidade Relativa				Cada grupo	Dia
1	20	70	VII	-	-	x	x
2	25	80	III	1	4	x	x
3	23	85	III	2	4	x	x
4	26	90	II	1	2	x	x
			III	3	4	x	
5	30	95	I	1	1	o	o
			II	2	2	o	
			III	4	4	o	
6	22	85	III	5	4	o	o
7	18	97	II	1	2	x	o
			III	6	4	o	
8	25	80	III	7	4	o	o
9	18	97	II	1	2	x	o
			III	8	4	o	
10	20	70	VII	-	-	x	x
11	25	80	III	1	4	x	x
12	18	97	II	1	2	x	x
			III	2	4	x	

2.2.5. MODELO BIOHIGROTÉRMICO

Este modelo foi desenvolvido por Sedlbauer e Krus [2, 14, 15], como uma extensão do modelo de isopletras descrito em 2.2.3, permitindo calcular o balanço de humidade de um esporo em casos de condições variáveis. De acordo com este autor, o bolor passa por certas fases de crescimento, nomeadamente a fase de atraso no crescimento inicial, a fase de aceleração e a fase de crescimento logarítmico. Este crescimento está diretamente dependente do substrato, sendo possível observar grandes diferenças consoante seja da categoria I ou II.

O modelo biohigrotérmico assenta na ideia de que os esporos dos bolores, na fase de atraso do crescimento inicial, vão absorver a humidade por fenómenos de difusão, caso o ambiente higrotérmico

seja favorável, até que seja atingida uma certa quantidade de humidade no interior do esporo que lhe permita iniciar através do seu metabolismo uma passagem para a fase de crescimento rápido.

Como já foi referido os esporos vão ser em grande parte influenciados pelo substrato, pois o tempo para que ocorra a sua germinação vai variar de forma bastante substancial em função dos nutrientes disponíveis. Atingindo a fase de crescimento logarítmico, os esporos vão ser capazes de começar a reproduzir unidades vegetativas e produzir biomassa de forma a tornar o seu crescimento num processo cíclico. Estes processos apenas ocorrer quando são atingidas as condições que façam com que haja um valor de humidade crítica no seu interior. Assim sendo, este modelo permitir descrever o desenvolvimento dos esporos até que seja atingida o valor de humidade crítica, sendo a absorção de água calculada de acordo com uma aproximação ao método de difusão. De seguida, utilizando as isopletras previamente desenvolvidas retirar determina-se o valor de humidade crítica, que estabelece o início do processo de desenvolvimento.

No entanto, para facilitar o cálculo, simplificou-se o método fazendo uma suposição na qual o esporo é visto como uma “parede biológica” (Fig. 2.6), tornando-a independente dos restantes componentes da parede e possibilitando assim a utilização de qualquer tipo de perfis de temperatura e humidade para a fronteira desta “parede”. Caso contrário, os resultados seriam incorretos, uma vez que o esporo iria ter uma resistência à difusão irrealisticamente alta.

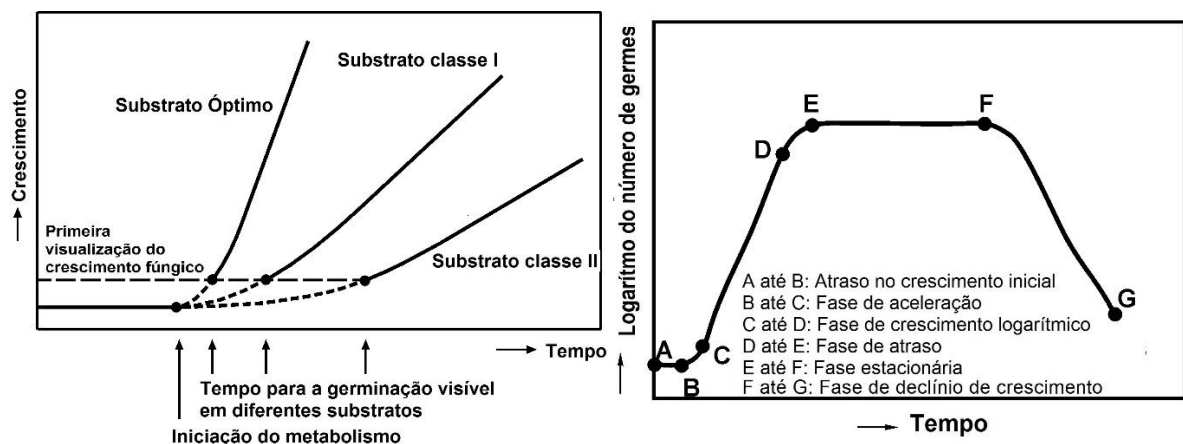


Fig. 2.5 Diagrama esquemático da ideia modelo para os processos de crescimento dependentes do substrato de acordo com as variadas fases (esquerda) e diagrama esquemático da curva de crescimento de uma cultura de bolor (adaptado de [2]).

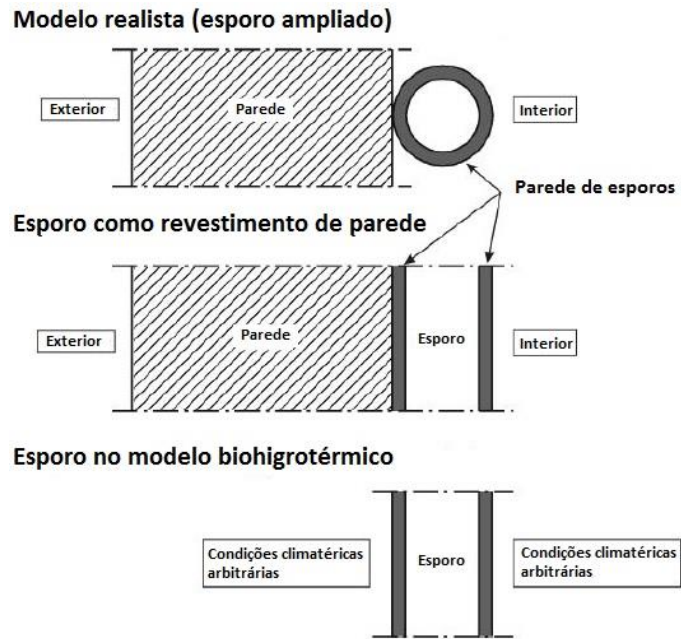


Fig. 2.6 - Comparação das diferentes aproximações feitas para a ideia final (esporos no modelo biohigrotérmico) no modelo biohigrotérmico (adaptado de [2]).

2.2.6. MODELO WUFI®-Bio

O WUFI®-Bio é uma ferramenta computacional utilizada para a previsão do crescimento de bolores em materiais de construção, com base no modelo biohigrotérmico, no qual se assume que os esporos têm a habilidade de absorver humidade devido ao seu potencial osmótico. Assim, o programa WUFI®-Bio determina a humidade contida dentro dos esporos para a posterior previsão do fenómeno de germinação de esporos. A taxa de crescimento é calculada com base nos sistemas de isopletras que foram desenvolvidos previamente em condições de temperatura e humidade relativa constante.

Na introdução de dados é necessário definir a humidade relativa inicial que afeta o início do processo, assim como seleccionar entre as diferentes classes de substratos (0, I, II ou K). A classe de substrato K foi introduzida de forma a diferenciar os perigos para a saúde que os bolores podem causar. Este sistema de isopletras para bolores considerados críticos para a saúde foi baseado com informação num substrato ótimo para o desenvolvimento de bolores [14].

Os resultados da simulação são o valor de água contida no esporo e o valor do conteúdo de água crítico, ou seja, o valor a partir do qual é possível que haja crescimento de bolor. Quando o bolor começa a germinar é possível obter, baseado nas condições climáticas simuladas, a curva de crescimento que permite uma previsão de crescimento máximo (Fig. 2.7 e 2.8).

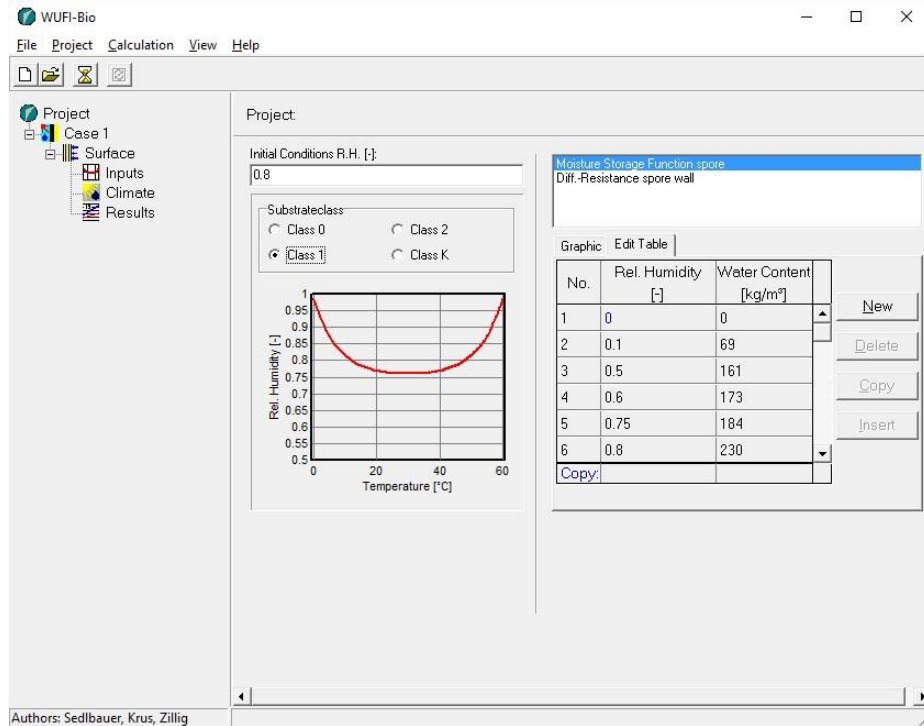


Fig. 2.7 – Introdução de humidade relativa inicial e substrato pretendido no programa WUFI®-Bio

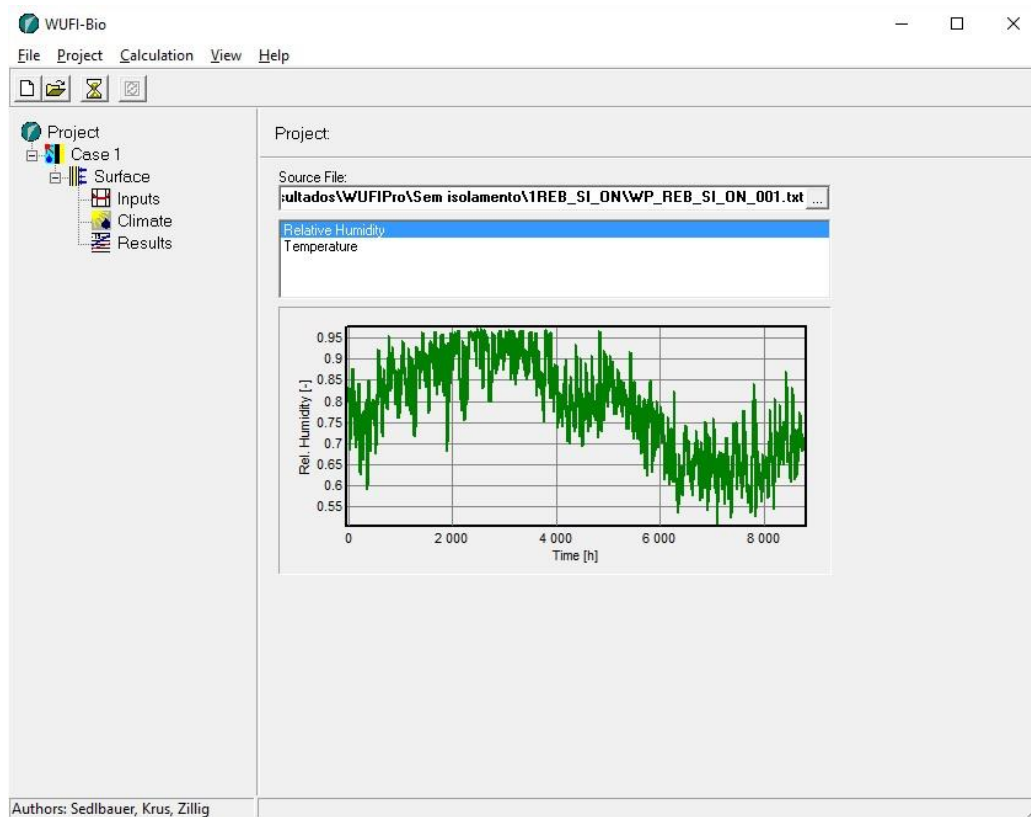


Fig. 2.8 – Introdução de climas para simulação higrótérmica no WUFI®-Bio

2.3. TRABALHOS REALIZADOS COM MODELOS DE PREVISÃO

Além do modelo VTT e Biohigrotérmico foram elaborados outros que não serão aqui descritos, modelos como o rácio de temperatura [16], “time of wetness” ou TOW [5] e os índices de crescimento de Johansson.[17] Além destes modelos de previsão de crescimento foram também elaborados outros sistemas de isopletras diferentes daquelas que Sedlbauer [2]elaborou. Exemplo disto são o sistema de isopletras de Ayerst [18], Smith e Hill [19], Clarke e Rowan [20] e Hens [21, 22] que apesar de terem a sua importância, não foram utilizadas no modelo Biohigrotérmico.

2.3.1. MODELO VTT

O modelo VTT, desde a sua elaboração sofreu alterações. Os seus autores continuaram ensaios de forma a alargar a gama de materiais, para aqueles fora do espectro da madeira. Foi feita uma análise ao comportamento de outros materiais, de modo a poder inclui-los nas classes previamente estabelecidas aplicado posteriormente um fator de correção, consoante o material utilizado [6, 23]. Os resultados foram bastante positivos, tornando este modelo numa possibilidade para a previsão de desenvolvimento de bolor.

2.3.2. MODELO BIOHIGROTÉRMICO

Sedlbauer foi dos autores com maior influência no desenvolvimento deste modelo. Este elaborou variados trabalhos, de modo a desenvolver as aplicações possíveis do modelo biohigrotérmico. Com o sistema de isopletras proposto por este e recorrendo ao programa WUFI®, fizeram análises para paredes ETICS ao longo de 2 anos, fazendo depois uma extrapolação temporal de 10 anos de forma a prever o término de crescimento, concluindo que este ocorria ao fim de dois anos. Estes também concluíram que o período com maior influência será o primeiro ano, sugerindo a criação de um biocida efetivo para o espaço de um ano.

2.3.3. COMPARAÇÃO DE MODELOS

A comparação entre ambos já foi elaborada em determinadas ocasiões de forma a poder dar uma maior compreensão da equivalência do Mould Index ao crescimento de bolor obtido no modelo biohigrotérmico [13, 24-26]. Com a realização de ensaios com cálculos feitos ao longo de um ano foi possível elaborar um gráfico com a comparação de ambas estas escalas de crescimento de bolor que com o tratamento através de uma função polinomial com correção BET obteve o seguinte aspeto (fig. 2.9):

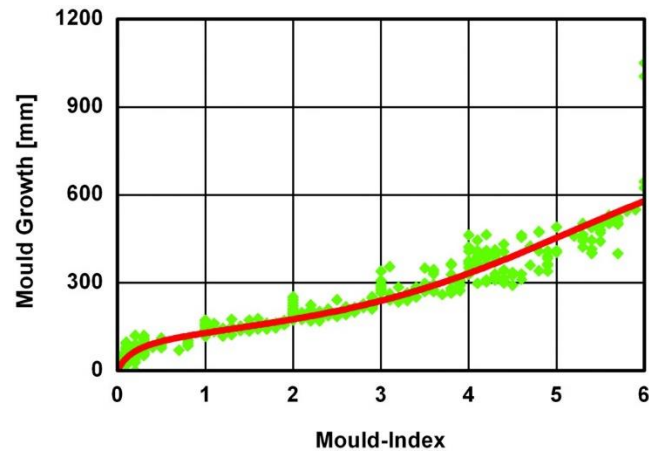


Fig. 2.9 – Comparação entre Mould Index e crescimento de bolor, através de uma função polinomial com correção BET (adaptado de [24]).

Ambos os modelos tiveram papéis preponderantes na análise e previsão do crescimento de bolors na edificação, permitindo não só observar a influência de fatores externos como a temperatura e humidade relativa do ambiente em que se inserem como também verificar o comportamento do bolor consoante o substrato em que se desenvolvem, a sua orientação e existência de camadas ou tratamentos que controlem a proliferação de estratos biológicos.

3

METODOLOGIA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o objetivo de avaliar o efeito no desenvolvimento de bolores em paredes com uma camada de gesso utilizando diferentes materiais de revestimento, orientações e inclusão de isolamento foram utilizados dois modelos de previsão: o modelo VTT atualizado e o modelo biohigrotérmico. Para tal, utilizou-se o software WUFI® Pro 5.2 para analisar a temperatura e humidade relativa da camada superficial das paredes para posterior introdução como dados de entrada nos modelos VTT atualizado e no software WUFI® Bio (ferramenta de apoio à aplicação do modelo biohigrotérmico).

A simulação foi realizada numa base anual, para a cidade do Porto, usando o clima disponível no programa WUFI® Pro 5.2. Relativamente ao clima interior, foram simulados 200 casos, gerados através do método de Monte Carlo. Com esta abordagem pretendeu-se avaliar o efeito da variabilidade do clima interior no desenvolvimento de bolores.

3.2. CASOS DE ESTUDO

Para cumprir os objetivos propostos foram definidos 12 casos de estudo em que se variaram os três fatores em análise: o material de revestimento interior, a presença ou não de uma camada isolante e a orientação da parede.

Em todos estes casos foi considerado uma parede de base comum a todos eles, constituída por duas camadas: uma camada de betão com 20 cm; e uma camada exterior de gesso com 2 cm. O resultado final foi uma disposição construtiva com a seguinte constituição (do exterior para o interior): gesso exterior (2 cm); poliestireno expandido (6 cm), nos casos com isolamento; betão (20 cm); e material de revestimento (1,5 ou 2 cm, consoante o material). Na Tabela 3.1 sintetiza-se a informação relativa a cada caso de estudo, incluindo a designação atribuída a cada um. As propriedades mais relevantes dos materiais utilizados nas simulações estão especificadas na Tabela 3.2, que inclui ainda a classificação dos materiais de revestimento para utilização no modelo VTT atualizado (classe de sensibilidade) e no modelo biohigrotérmico (tipo de substrato). As soluções adotadas para este trabalho apresentam um coeficiente de transmissão térmica (U) de 2,3, 2,1 e 2,2 para situações sem isolamento e 0,516, 0,507 e 0,509 para situações com isolamento.

Tabela 3.1 – Casos de estudo

Número do caso	Material de revestimento	Isolamento	Orientação	Designação
1	Reboco de gesso	Sem isolamento	Norte	REB_SI_ON
2	Madeira de fibras de média densidade (MDF)	Sem isolamento	Norte	MDF_SI_ON
3	Madeira não tratada	Sem isolamento	Norte	MAD_SI_ON
4	Reboco de gesso	Sem isolamento	Sul	REB_SI_OS
5	Madeira de fibras de média densidade (MDF)	Sem isolamento	Sul	MDF_SI_OS
6	Madeira não tratada	Sem isolamento	Sul	MAD_SI_OS
7	Reboco de gesso	Com isolamento	Norte	REB_CI_ON
8	Madeira de fibras de média densidade (MDF)	Com isolamento	Norte	MDF_CI_ON
9	Madeira não tratada	Com isolamento	Norte	MAD_CI_ON
10	Reboco de gesso	Com isolamento	Sul	REB_CI_OS
11	Madeira de fibras de média densidade (MDF)	Com isolamento	Sul	MDF_CI_OS
12	Madeira não tratada	Com isolamento	Sul	MAD_CI_OS

Tabela 3.2 – Materiais utilizados e as suas especificações

Material	e (m)	γ (kg/m ³)	ξ	C,seco (J/kg.K)	λ ,seco (W/m.K)	μ
Gesso exterior	0,02	1219	0,3	850	0,25	10,8
Betão C12/15	0,2	2200	0,18	850	1,6	92
Reboco de gesso	0,015	850	0,65	850	0,2	8,3
Madeira de fibras de média densidade (MDF)	0,015	508	0,66	1700	0,12	15
Madeira não tratada	0,02	550	0,66	1700	0,18	70
Poliestireno expandido	0,06	30	0,95	1500	0,04	50

Os materiais de revestimento foram selecionados tendo em conta a classificação relativa ao substrato em que se inserem (I e II no modelo biohigrotérmico) e a classe de sensibilidade (muito sensível, sensível e resistência média no modelo VTT atualizado), com o objetivo de se obter, pelo menos, um material representativo de cada grupo. Na tabela 3.3 estão descritos os tipos de substrato e classe de sensibilidade que cada material de revestimento representa.

Tabela 3.3 – Classes e tipos de substrato

Material	Classe de sensibilidade	Tipo de substrato
Reboco de gesso	Resistência média	II
Madeira de fibras de média densidade (MDF)	Sensível	I
Madeira não tratada	Muito sensível	I

3.3. GERAÇÃO DE CLIMAS INTERIORES

O efeito da variabilidade do clima interior no desenvolvimento de bolores foi testado através da criação de um número elevado de cenários (200 casos), gerados a partir de um clima base, utilizando o método de Monte Carlo. Este método permite estudar a variabilidade de determinados parâmetros, ganhando importância na área de Engenharia Civil, por exemplo, na realização de estudos de previsão térmica [27] e energética e da análise de custos de ciclo de vida [28]

O método de Monte Carlo consiste na geração de valores aleatórios com uma determinada distribuição de probabilidade de forma a criar vários cenários para posterior simulação. O método de Monte Carlo utiliza uma sequência de números aleatórios obtidos através de um clima inicial do qual se conhecem as respetivas distribuições de probabilidade (média, desvio padrão, etc.). Para cada parâmetro de entrada no modelo vão ser gerados n valores aleatórios que com os padrões de distribuição estabelecidos inicialmente vão originar um conjunto de n respostas por simulação do sistema. A Figura 3.1 mostra esquematicamente o princípio do método de Monte Carlo sob a forma de um exemplo no qual são introduzidos três parâmetros, obtendo-se uma resposta.

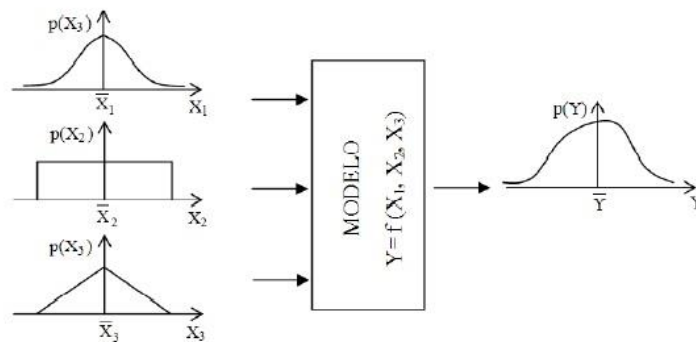


Fig. 3.1 – Método de simulação de Monte Carlo para três parâmetros de entrada e um de saída (adaptado de [29]).

A exatidão dos resultados vai depender diretamente do número de simulações que forem executadas, ficando, por isso à medida que este aumenta, cada vez mais próximo do valor exato. Não há no entanto um número mínimo de simulações que nos dê uma noção da incerteza do resultado, sendo assim introduzido um método que permite que os resultados obtidos sejam melhorados e mais precisos, através de redução da variância. Este método tem o nome de Hipercubo Latino e é uma técnica de amostragem estratificada de forma a aplicar uma distribuição de probabilidades escolhidas para as variáveis de entrada. Este método escolhe os valores aleatoriamente de forma dependente, dividindo a distribuição em intervalos com a mesma probabilidade de sorteio e depois é selecionado um valor de cada. Na Figura 3.2 pode-se ver um exemplo da aplicação do método do Hipercubo Latino com amostras aleatórias.

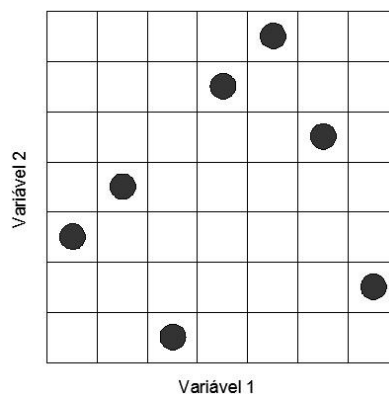


Fig. 3.2 - Amostras aleatórias pelo método Hipercubo Latino (adaptado de [30]).

No âmbito deste trabalho foram gerados 200 climas interiores a partir de um clima base que se considerou traduzir a variação típica da temperatura e da humidade relativa numa habitação com risco elevado de aparecimento de bolores. Foi considerado uma distribuição do tipo normal quer para a temperatura, quer para a humidade relativa, com um desvio de padrão de 15% em ambas. A Figura 3.3 mostra a variação anual da temperatura e da humidade relativa dos climas gerados, realçando-se o clima base. Verifica-se que a temperatura do clima base varia entre 18 e 26 °C, alargando-se o intervalo para 10 a 35 °C considerando os 200 casos. Relativamente à humidade relativa o intervalo inicial é de 60 a 80 %, passando para 50 a 95% considerando os 200 casos.

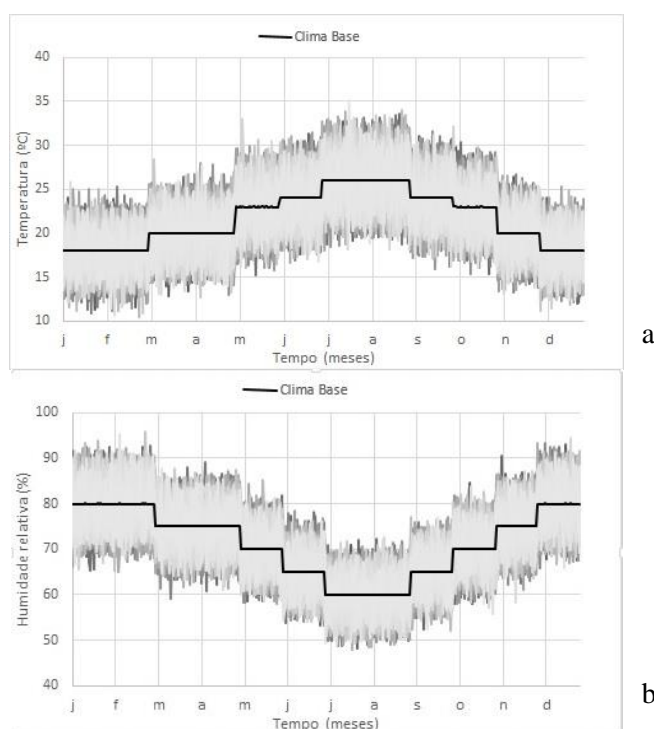


Fig. 3.3 – Resultados gráficos da variação da temperatura (a) e humidade relativa (b) dos 200 climas gerados ao longo do tempo, em comparação com o clima base.

3.4. APLICAÇÃO DOS MODELOS

Na Figura 3.4 está esquematicamente representada a metodologia adotada neste trabalho. Após a definição dos casos de estudo e da criação dos climas interiores, foram efetuadas 2400 simulações no programa WUFI® Pro 5.2 para obter a flutuação anual da temperatura e da humidade relativa superficial da camada interior da parede. Estes valores correspondem aos dados de entrada necessários nas equações para aplicação do modelo VTT e no programa WUFI®-Bio, para a aplicação do modelo biohigrotérmico. Os dados de saída dos modelos são, respetivamente, o Mould Index e o crescimento em milímetros. A partir dos resultados foi possível fazer-se uma comparação destes parâmetros com a variação não só a temperatura e humidade relativa interiores, como também do material de revestimento, da orientação e da existência ou não de uma camada de isolamento, analisando-se a sua influência no desenvolvimento de bolores.

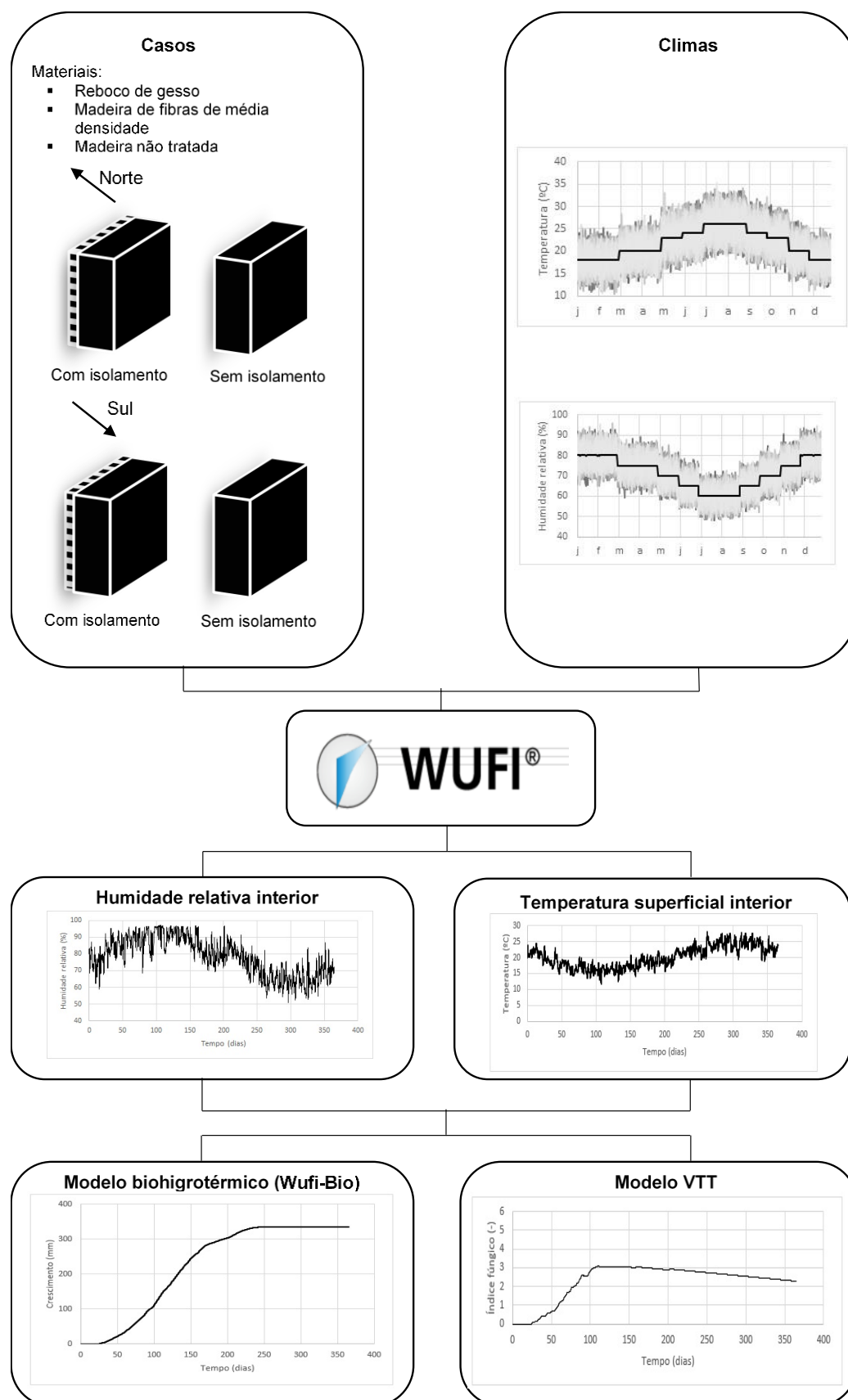


Fig. 3.4 – Modelo esquemático da metodologia

3.5. SELEÇÃO DOS CLIMAS MAIS E MENOS GRAVOSOS

A utilização de 200 casos de clima interior conduziu a um elevado número de resultados, cuja análise, em certas circunstâncias, pode ser complexa. Desta forma, para facilitar a interpretação dos resultados, foi realizada uma seleção prévia dos climas mais e menos gravesos. O objetivo de selecionar estes casos extremos foi permitir, juntamente com o clima base, ficar com uma ideia da flutuação dos resultados.

Com os resultados obtidos nas simulações fez-se uma análise prévia para identificar os climas que produziram os valores máximos de crescimento (modelo biohigrotérmico) e Mould Index (modelo VTT atualizado). Esses resultados estão traduzidos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores máximos de crescimento e Mould Index e respetivos climas

Caso de estudo	Mould Index máximo	Clima	Crescimento máximo (mm)	Clima
1	3.2	176	403	72
2	5.3	89	508	72
3	6.0	176	632	72
4	3.1	176	300	72
5	5.3	89	473	72
6	6.0	17	517	72
7	1.8	99	121	123
8	4.3	176	225	72
9	6.0	136	265	72
10	1.6	99	105	72
11	4.2	176	218	72
12	6.0	136	241	72

Além desta análise foram também identificados os climas que conduziram aos valores médios extremos, quer da temperatura, quer da humidade relativa da superfície interior das paredes, obtendo-se os resultados expostos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Climas que originaram valores médios máximos e mínimos da temperatura e da humidade relativa superficial

Climas	Temperatura superficial	Humidade relativa superficial
Máximo	161	72
Mínimo	121	88

Tendo em conta estes resultados, assim como os da tabela anterior, é possível reparar que os valores máximos de humidade relativa (clima 72) são aqueles que provocam valores mais altos de crescimento de bolores de acordo com o modelo biohigrotérmico (exceto no caso 7).

Com estas duas análises, decidiu-se considerar os seguintes cenários:

- Clima 72: clima com valores médios de humidade relativa mais altos;
- Clima 88: clima com valores médios de humidade relativa mais baixos;
- Clima 176: clima que provocou maiores valores de Mould Index com maior frequência nos variados materiais.

Nas Figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 apresenta-se a variação anual da temperatura e da humidade relativa destes climas.

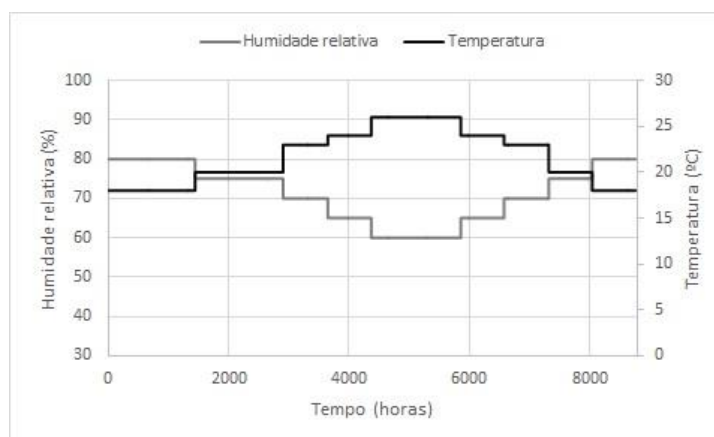


Fig. 3.5 – Clima base

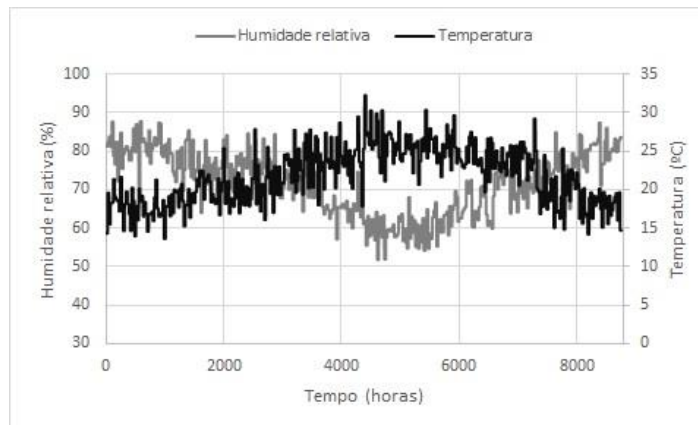


Fig. 3.6 – Clima 72

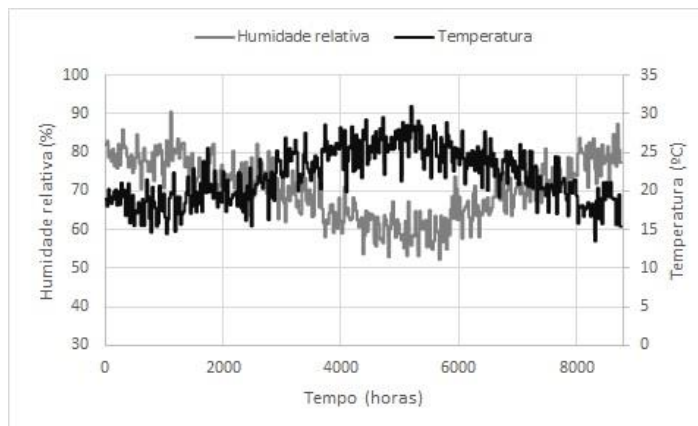


Fig. 3.7 – Clima 88

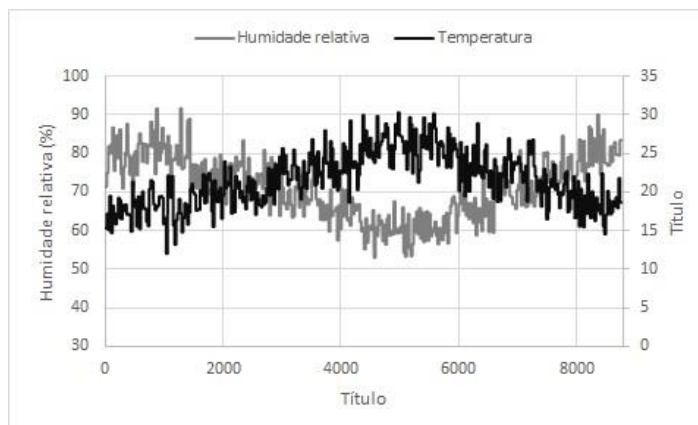


Fig. 3.8 – Clima 176

4

RESULTADOS POR MODELO

4.1. DADOS DE ENTRADA NOS MODELOS VTT E BIOHIGROTÉRMICO

Para que se possa proceder à previsão do desenvolvimento de bolores de acordo com os modelos VTT atualizado e biohigrotérmico são necessários, dados da temperatura e da humidade relativa da superfície mais interior do elemento em estudo. Neste trabalho, essa informação foi obtida através de simulação com recurso ao programa WUFI®-Pro 5.2.

Na Figura 4.1 ilustra-se um exemplo do tipo de resultados obtidos a partir do programa WUFI®-Pro 5.2.

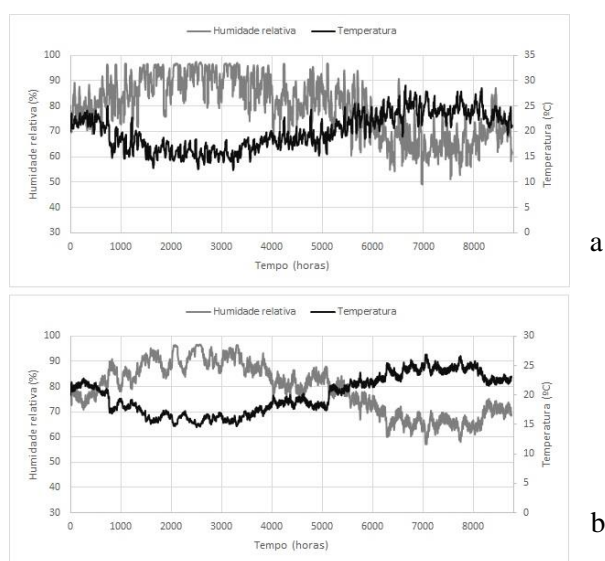


Fig. 4.1 – Temperatura e humidade relativa superficiais no elemento construtivo revestido com reboco de gesso, com orientação norte e sem isolamento (Caso 1): a) clima 72; b) clima base.

Neste exemplo é possível observar que, tanto para o caso do clima 72, como para o clima base, após as primeiras 800 horas os valores de humidade relativa e temperatura começa a sofrer alterações significativas. No caso da humidade relativa esta começará a decrescer, atingido valores máximos de cerca de 95% perto das 2500-3000 horas, sendo que a temperatura terá o efeito exatamente contrário diminuindo para valores de aproximadamente 15°C. Após atingirem estes máximos e mínimos respetivamente, a humidade relativa vai começar a decrescer para valores de 60 a 70% e, como esperado, a temperatura vai começar a subir para temperaturas por volta dos 25°C. Destaca-se ainda a maior variação dos valores associados ao clima 72 que se traduz, por exemplo, na ocorrência em número muito

superior de situações com humidade relativa próxima dos 95%, o que indicia que este clima conduz a uma situação de risco mais elevado de desenvolvimento de bolores.

O elevado número de resultados produzido neste trabalho obrigou à definição de um esquema de símbolos e cores que permitisse organizar os dados de forma mais coerente, facilitando a interpretação das figuras através da diferenciação entre os casos em análise. Na Tabela 4.1 expõe-se o sistema de símbolos e cores que foi adotado.

Tabela 4.1 – Esquema de símbolos e cores adotado na interpretação dos resultados.

Material e isolamento	Orientação	
	Norte (ON)	Sul (OS)
REB_SI	▲	▲
MDF_SI	■	■
MAD_SI	◆	◆
REB_CI	×	×
MDF_CI	✱	✱
MAD_CI	●	●

4.2. MODELO VTT ATUALIZADO

4.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Para o modelo VTT atualizado os resultados são apresentados sob a forma de Mould Index. Este valor, como foi explicado nos pontos 2.2.1 e 2.2.2, varia entre 0 e 6. No subcapítulo seguinte apresenta-se uma análise aos resultados da aplicação deste modelo, considerando os três climas pré-selecionados de acordo com os critérios apresentados no ponto 3.5 juntamente com o clima base, de forma a ter um a noção da variação dos valores tomados pelo Mould Index. Posteriormente é efetuada uma análise mais abrangente em que os 200 casos são incluídos na avaliação dos 12 casos de estudo. Na avaliação dos resultados considerando os 200 climas optou-se por utilizar a distribuição acumulada (percentis) do valor máximo de Mould Index, por se tratar de um formato que facilita a sua interpretação. O objetivo foi avaliar o efeito da utilização de diferentes materiais de revestimento, da existência ou não de uma camada de isolamento térmico e da orientação da parede em causa.

4.2.2. RESULTADOS COM 4 CLIMAS

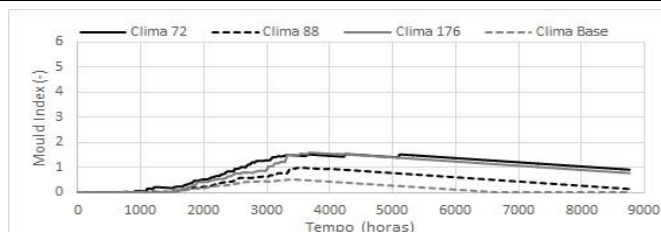
Os resultados para os 4 climas escolhidos para uma observação mais detalhada são apresentados na forma de gráficos com a variação do valor de Mould Index ao longo do tempo. Na Tabela 4.2 estão expostos os resultados consoante o caso de estudo.

Tabela 4.2 – Resultados de Mould Index para os 4 climas ao longo de 1 ano (8670 horas)

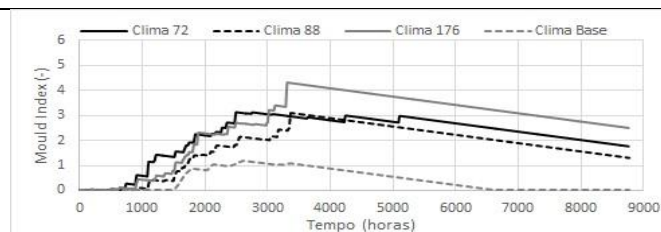
Caso	Gráfico
Caso 1 – REB_SI_ON	
Caso 2 – MDF_SI_ON	
Caso 3 – MAD_SI_ON	
Caso 4 – REB_SI_OS	
Caso 5 – MDF_SI_OS	
Caso 6 – MAD_SI_OS	

Tabela 4.2 – Resultados de Mould Index para os 4 climas ao longo de 1 ano (8670 horas)
(continuação)

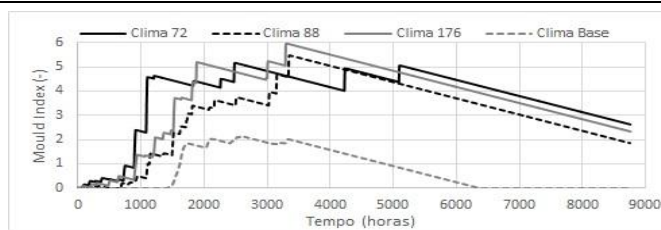
Caso 7 – REB_CI_ON



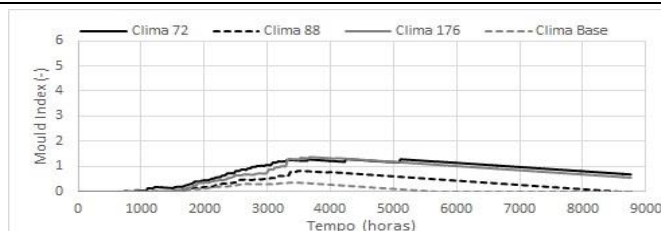
Caso 8 – MDF_CI_ON



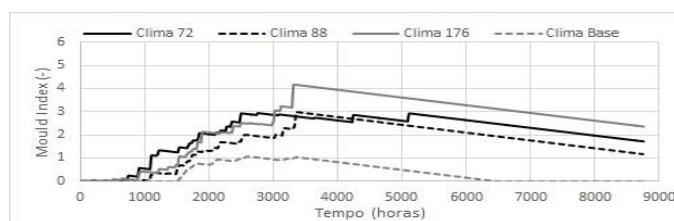
Caso 9 – MAD_CI_ON



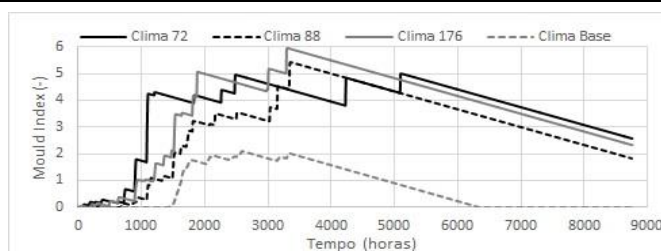
Caso 10 – REB_CI_OS



Caso 11 – MDF_CI_OS



Caso 12 – MAD_CI_OS



É possível verificar que os resultados se alteram bastante entre os vários casos de estudo, confirmando que tanto o clima 72 como o clima 176 são os mais gravosos, seguidos do clima 88 e finalmente do clima base, que apresenta em todos os casos os valores de Mould Index mais baixos. Este facto, aparentemente surpreendente, está relacionado com o carácter estacionário do clima base, que mantém a temperatura e a humidade relativa constantes ao longo de cada mês. Todos os outros climas, fruto da metodologia adotada na sua criação, apresentam flutuações diárias de acordo com os critérios impostos, conduzindo sempre a situações mais gravosas em termos de risco de desenvolvimento de bolores. Confirma-se assim a importância do clima interior na avaliação deste tipo de fenómenos.

Fazendo uma análise aos resultados do Mould Index ao longo do tempo, observa-se que estes valores começam a crescer significativamente por volta das 800 horas, resultado do referido no ponto 4.1, onde se verificou que neste período a humidade relativa começa a aumentar significativamente. Este fenómeno conduz ao desenvolvimento de bolor, fazendo então com que o valor de Mould Index comece a subir, até que estabiliza, ou aumenta ligeiramente, por volta das 2500-3000 horas, instante em que a humidade relativa decresce. Após serem atingidos os valores máximos de Mould Index, ocorre um decréscimo gradual devido ao sistema de redução imposto pelo modelo VTT atualizado para condições não favoráveis ao desenvolvimento de bolores, como aquelas verificadas após as 3000 horas.

4.2.2.1. Material de revestimento

Quando se observa os resultados da variação do Mould Index, consoante o material escolhido para atuar como revestimento interior, desde logo destaca-se a importância da classe de sensibilidade como fator que influencia decisivamente o desenvolvimento de bolor.

A classe de sensibilidade “muito sensível”, representada neste trabalho pela madeira não tratada, obteve os valores mais elevados de Mould Index, chegando mesmo, para determinadas combinações (casos 3, 6, 9 e 12), a atingir o máximo da escala ($M=6$). Por outro lado, para o material com a classe de sensibilidade “resistência média” (reboco de gesso) os resultados são bastante diferentes, uma vez que o valor máximo atingido com este material não foi além de $M\approx 3$ (casos 1, 4, 7 e 10).

Considerando a relação entre os materiais de revestimento e os climas pré-selecionados, pode-se concluir que a escolha do material não afeta a preponderância de um clima ser mais ou menos gravoso. Confirma-se, portanto, que o clima 72 e 176 são os mais propícios ao crescimento de bolor, contrariamente ao clima base que é aquele que provoca menor desenvolvimento de bolor.

4.2.2.2. Existência de isolamento térmico

A presença de uma camada de isolamento térmico é notória nos resultados. Verifica-se que nos casos em que existe isolamento se atingem picos de valores de Mould Index mais baixos do que aqueles obtidos para casos em que não existe uma camada de isolamento.

É possível notar, por exemplo, que entre o caso 1 e caso 7, (casos com revestimento de reboco de gesso, orientados a norte, que apenas diferem pela presença da camada de isolamento térmico) o valor máximo do Mould Index diminui de aproximadamente 3 para um valor abaixo de 2, considerando os climas 72 e 176 (mais gravosos).

Os únicos casos em que as diferenças não são tão evidentes são os que incluem a madeira não tratada como material de revestimento. Isto acontece porque o valor de Mould Index está limitado a 6, valor que é atingido rapidamente nos casos com este substrato. Este facto aponta para a importância decisiva do material de revestimento no resultado final.

Outro fenómeno importante que se verifica nos casos com camada de isolamento térmico, e devido ao sistema de redução de Mould Index característico do modelo VTT atualizado, é que o valor de M sofre reduções maiores ao longo do tempo, chegando mesmo na aplicação do clima base a atingir novamente valores nulos ($M=0$). O mesmo não se verifica para situações sem a camada de isolamento térmico.

Refere-se ainda que a presença de isolamento, em algumas combinações (caso 5 versus caso 11, por exemplo), potencia as diferenças entre climas. De forma a ver a variação que a introdução da camada de isolamento induz, elaborou-se dois gráficos (fig. 4.2 e 4.3) que mostram a comparação das temperaturas e humidades relativas, superficiais, no período de uma semana (do dia 100 ao 107 neste exemplo) para dois casos que diferem apenas existência de uma camada de isolamento (caso 5 e caso 11).

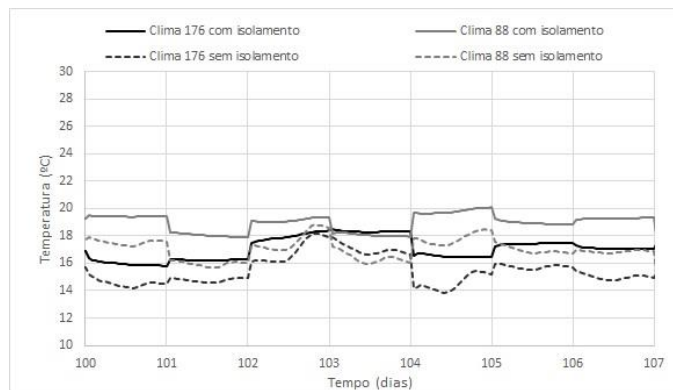


Fig. 4.2 – Comparação da humidade relativa superficial de dois climas (clima 88 e clima 176) para dois casos com e sem isolamento (Caso 5 e caso 11)

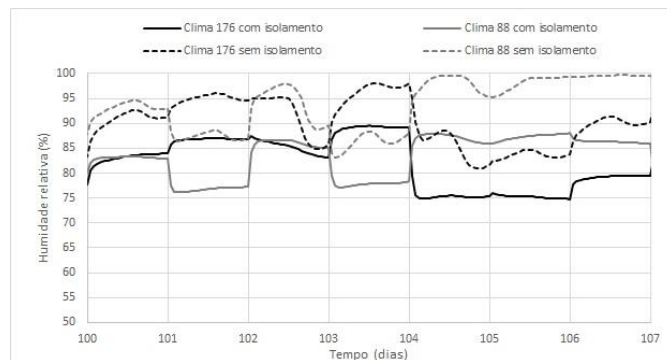


Fig. 4.3 - Comparação da temperatura superficial de dois climas (clima 88 e clima 176) para dois casos com e sem isolamento (Caso 5 e caso 11)

De facto, verifica-se que os climas sem a camada de isolamento têm condições mais propícias ao desenvolvimento de bolores.

4.2.2.3. Orientação

De acordo com estes resultados, o efeito da orientação, neste caso entre norte e sul, é pouco relevante para o valor do Mould Index, independentemente dos casos, obtendo-se valores ligeiramente superiores

para os casos com orientação norte, como seria de esperar. Estes resultados podem ser justificados uma vez que a orientação afeta sobretudo a temperatura e humidade relativa superficial exterior e o desenvolvimento de bolores depende principalmente das condições no interior.

4.2.3. AVALIAÇÃO DOS 200 CLIMAS

4.2.3.1. Materiais de revestimento

Nesta subsecção pretende-se analisar o efeito do material de revestimento no valor máximo do Mould Index. Nesse sentido, apresentam-se de seguida quatro gráficos (fig. 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7) onde se evidencia o efeito do substrato no desenvolvimento de bolores.

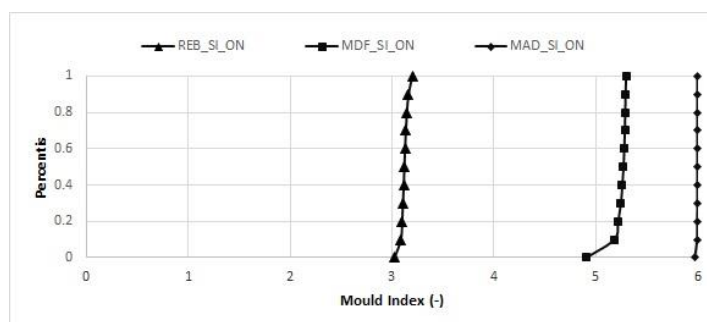


Fig. 4.4 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento e orientação norte variando o material.

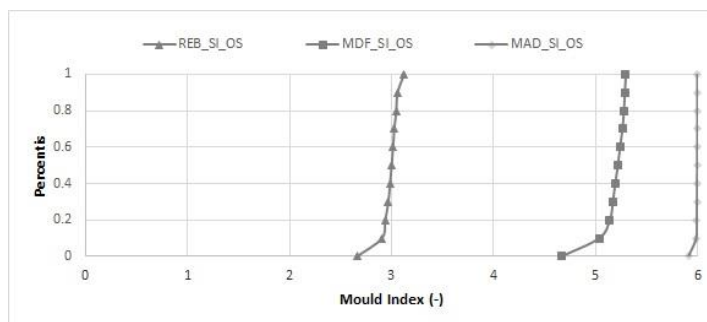


Fig. 4.5 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento e orientação sul variando o material.

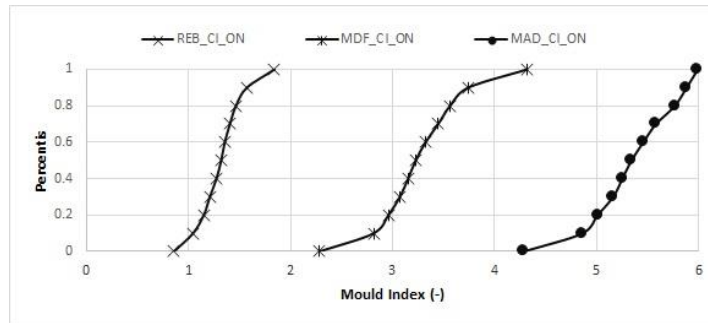


Fig. 4.6 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento e orientação norte variando o material.

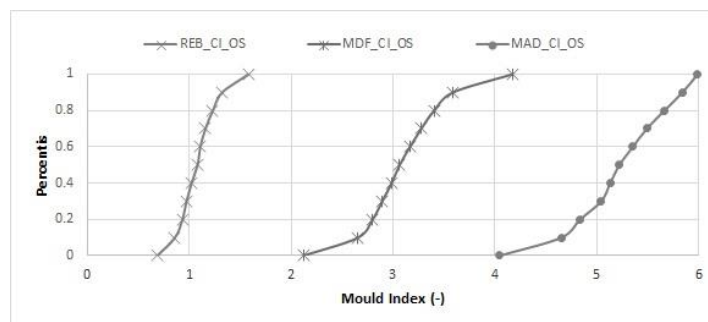


Fig. 4.7 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento e orientação sul variando o material.

Analisando as figuras anteriores é possível concluir que, independentemente da inclusão da camada de isolamento térmico e da orientação, a classe de sensibilidade é fundamental para o resultado final, ou seja, obtêm-se valores mais baixos no caso do revestimento com reboco de gesso e valores mais altos no caso do revestimento com madeira não tratada.

A diferença entre os diferentes materiais é evidente e aproximadamente equidistante (fig. 4.6 e 4.7), exceto nos casos sem isolamento, onde os resultados para o revestimento com madeira estão claramente limitados pelo próprio modelo ($M=6$).

Para os casos com o revestimento em reboco de gesso, verifica-se que os valores se encontram entre 2,6 e 3,2, aproximadamente, quando não existe isolamento térmico, e entre 0,7 e 1,8 quando existe a camada de isolamento. No entanto, para os casos com MDF estes valores sobem consideravelmente, passando o Mould Index a variar entre 4,6 e 5,3, aproximadamente, para casos sem isolamento, e entre 2,1 e 4,3 quando existe isolamento. Para a madeira não tratada, quando não há presença de isolamento, o valor do Mould Index atinge o limite máximo do modelo ($M=6$) e varia entre 4 e 6, aproximadamente, para os casos com isolamento térmico.

4.2.3.2. Existência de isolamento térmico

Observaremos agora as variações que resultam de aplicação ou não de uma camada com a função de isolamento. Produzem-se assim dois gráficos, com a Figura 4.8 a demonstrar a distribuição do Mould Index para os casos com disposições construtivas e orientação Norte, variando apenas a presença de

isolamento e a Figura 4.9 a demonstrar o mesmo, diferenciando que nesta estão visíveis os casos com orientação Sul.

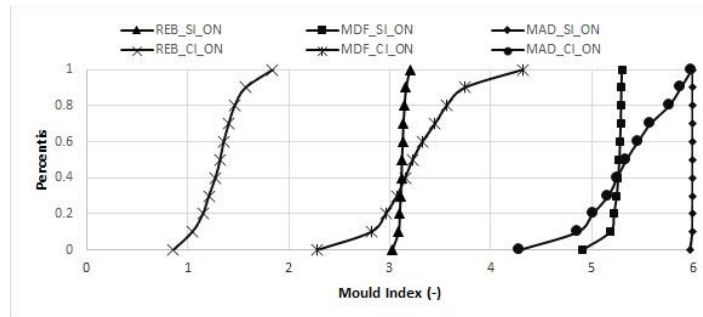


Fig. 4.8 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com orientação norte variando a existência de isolamento.

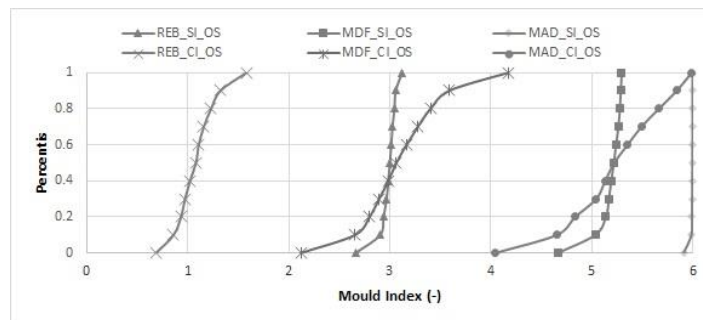


Fig. 4.9 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com orientação sul variando a existência de isolamento.

A primeira conclusão que se retira é que, como seria de esperar, os valores de Mould Index sofrem um grande decréscimo, quando aplicada uma camada de isolamento térmico. Observa-se ainda que a distribuição dos valores máximos de Mould Index para casos sem isolamento térmico apresenta uma menor dispersão. A introdução do isolamento térmico provoca uma redução do efeito do clima exterior nas condições higrotérmicas da superfície interior, aumentando assim a importância da variabilidade do clima interior. Este fenómeno foi previamente abordado na subsecção 4.2.1.2.

Por exemplo, no caso do reboco de gesso com orientação sul, quando consideradas as mesmas condições variando apenas a presença do isolamento térmico, vai ocorrer um decréscimo muito relevante, uma vez que, com isolamento térmico, mais de 80% dos valores se encontram abaixo de 1,3 e, para os casos sem isolamento, os valores são muito próximos de 3. No caso do MDF, os valores de Mould Index vão sofrer um decréscimo idêntico. Nos casos com isolamento térmico 80% dos valores estão abaixo de 3,3 e, para casos sem isolamento, cerca de 95% dos valores estão abaixo de 5,2. Por fim, para a madeira não tratada observa-se que aplicação de isolamento térmico reduziu os valores de uma distribuição de quase 100% das ocorrências com o valor máximo de 6 para valores entre 4 e 6.

4.2.3.3. Orientação

As fig. 4.10 e 4.11 procuram evidenciar as diferenças nos resultantes da orientação da parede.

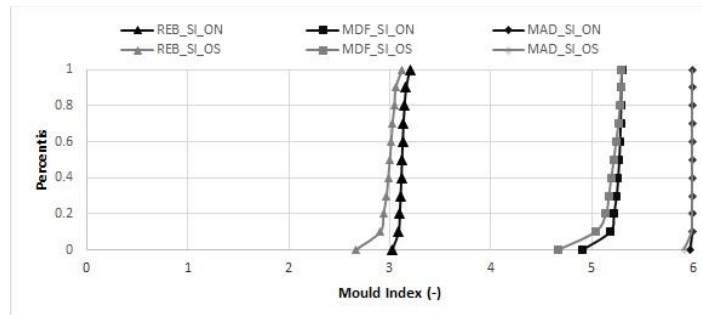


Fig. 4.10 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento variando a orientação.

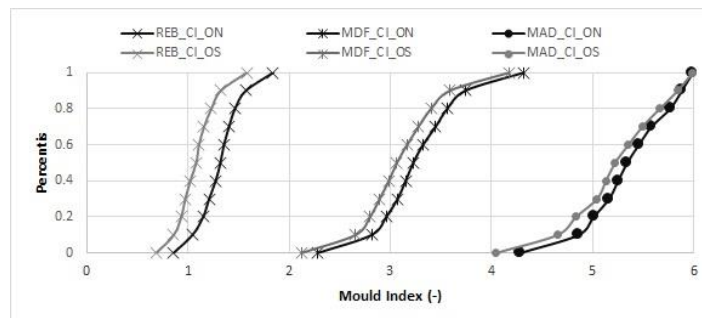


Fig. 4.11 – Distribuição dos valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento variando a orientação.

Observa-se que o tipo de distribuição (variabilidade) não é afetada, variando apenas a grandeza dos valores assumidos pelo Mould Index, embora de uma forma pouco significativa. Desta forma, o efeito da orientação traduz-se numa ligeira translação da curva de valores acumulados, com valores mais elevados nos casos com orientação norte. Esta translação é tanto mais evidente quanto mais baixos são os valores do Mould Index

4.3. MODELO BIOHIGROTÉRMICO

4.3.1. NOTA INTRODUTÓRIA

O modelo biohigrotérmico foi aplicado utilizando a ferramenta WUFI® Bio que fornece como dado de saída o valor do crescimento de bolores em milímetros (embora se trate de uma medida sem significado real). Tal como foi feito para o modelo VTT atualizado, é inicialmente apresentada uma análise mais pormenorizada considerando apenas o clima base e os climas 72, 176 e 88. Posteriormente, é efetuada uma análise dos resultados do crescimento considerando todos os 200 climas gerados.

4.3.2. RESULTADOS COM 4 CLIMAS

Tal como foi feito para o modelo VTT atualizado, apresentam-se os resultados para os 4 climas previamente escolhidos de forma a ser possível efetuar uma análise mais detalhada do fenómeno (Tabela 4.3). Nos gráficos pode observar-se a variação do valor de crescimento em milímetros ao longo de 1 ano (8760 horas).

Tabela 4.3 – Resultados do crescimento em milímetros para os 4 casos de estudo detalhado ao longo de 1 ano (8760 horas)

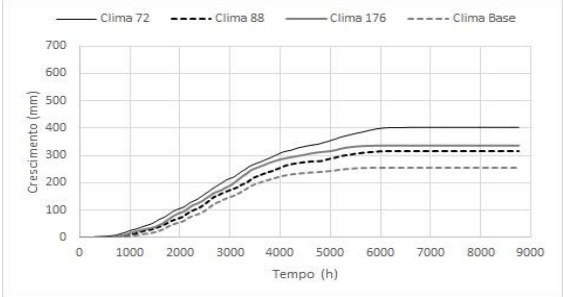
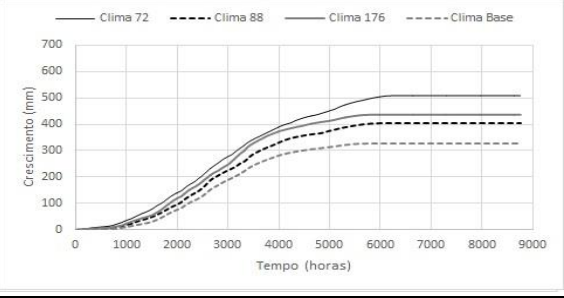
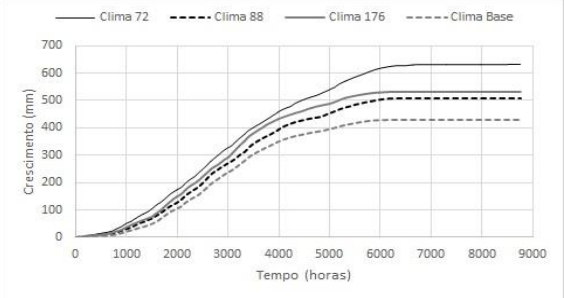
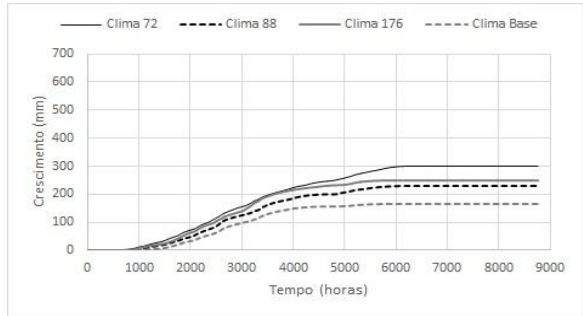
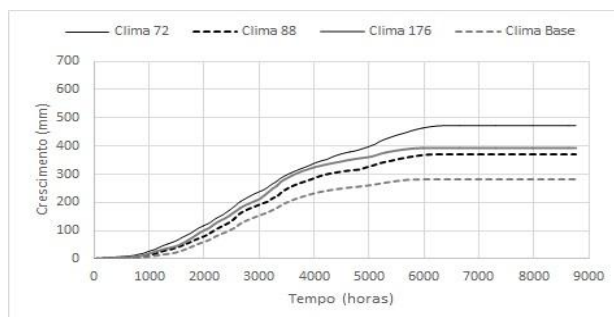
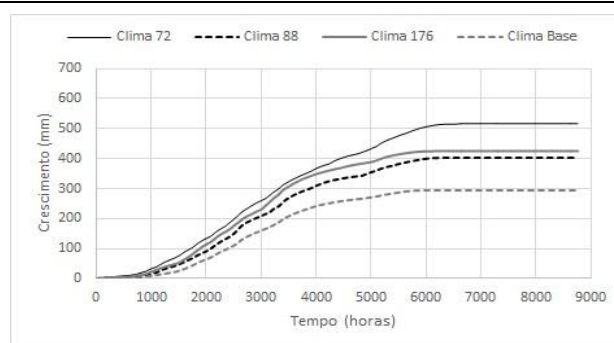
Caso	Gráfico
Caso 1 – REB_SI_ON	
Caso 2 – MDF_SI_ON	
Caso 3 – MAD_SI_ON	
Caso 4 – REB_SI_OS	

Tabela 4.3 – Resultados do crescimento em milímetros para os 4 casos de estudo detalhado ao longo de 1 ano (8670 horas) (continuação)

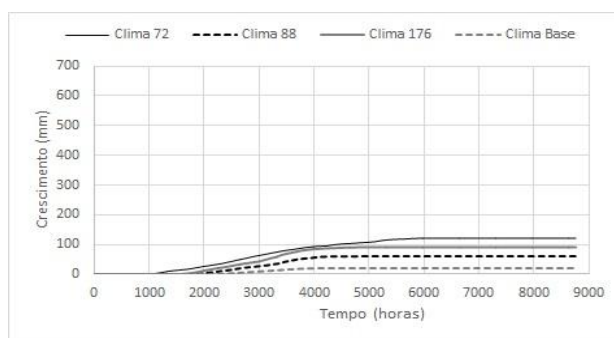
Caso 5 – MDF_SI_OS



Caso 6 – MAD_SI_OS



Caso 7 – REB_CI_ON



Caso 8 – MDF_CI_ON

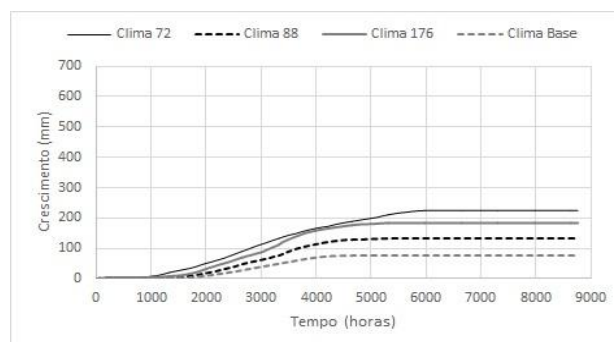
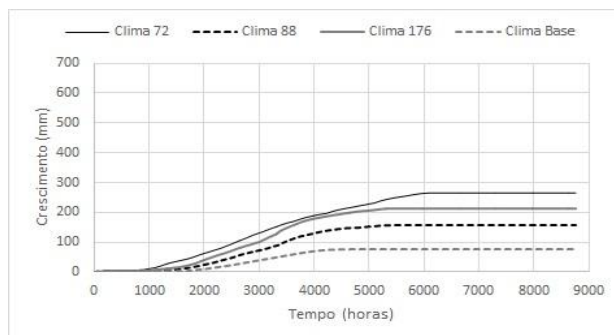
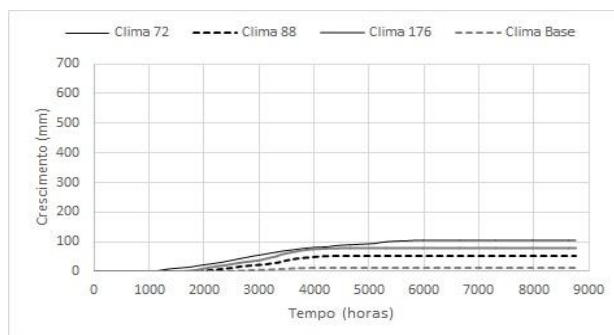


Tabela 4.3 – Resultados do crescimento em milímetros para os 4 casos de estudo detalhado ao longo de 1 ano (8670 horas) (continuação)

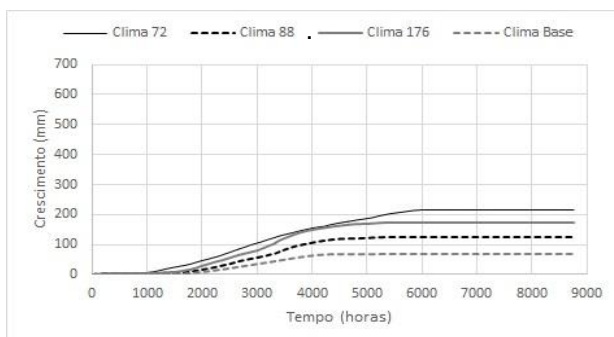
Caso 9 – MAD_CI_ON



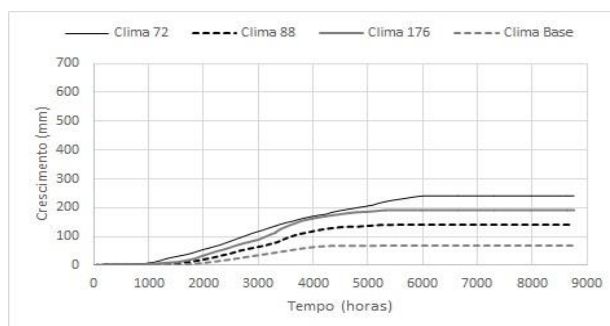
Caso 10 – REB_CI_OS



Caso 11 – MDF_CI_OS



Caso 12 – MAD_CI_OS



Consultando a Tabela 4.4, pode observar-se a variação dos valores do crescimento, desde o caso mais suscetível ao desenvolvimento de bolores, a madeira não tratada, sem isolamento térmico e com orientação a norte, até ao caso menos sensível que corresponde ao revestimento com reboco de gesso, com isolamento térmico e com orientação a sul.

Neste modelo consegue-se desde logo verificar que o clima que apresenta uma média de humidade relativa mais elevada (clima 72) é aquele que apresenta um crescimento maior, ao contrário do sucedido no modelo VTT atualizado onde com o clima 176 se obtinha, por vezes, valores superiores. Também se confirma que o clima base é aquele que conduz a um menor crescimento do bolor, por apresentar condições mais estáveis.

Tal como o modelo VTT atualizado, nesta análise ao longo das 8670 horas (1 ano), pode-se observar que os valores começam a aumentar perto das 800 horas. No entanto, contrariamente ao modelo VTT atualizado, no modelo biohigrotérmico o crescimento apenas estabiliza por volta das 6000 horas, quando a temperatura já atingiu valores elevados e a humidade relativa do ar baixou para valores muito inferiores àqueles que são propícios ao desenvolvimento.

4.3.2.1. Material de revestimento

Alternando o tipo de material escolhido para atuar como camada interior, obtemos resultados diferentes dentro do que seria de esperado. O material reboco de gesso é aquele que obteve valores de crescimento menores, com valores entre os 400mm (caso sem isolamento e orientação Norte) e os 100mm (caso com isolamento e orientação Sul), contrariamente ao material madeira não tratada que terá valores entre os 630mm e os 240mm para as mesmas condições mencionadas anteriormente. O MDF obteve valores estabelecidos entre estes dois materiais, assim como aconteceu para o modelo VTT.

4.3.2.2. Existência de isolamento térmico

Relativamente à influência do isolamento térmico, é possível observar que para casos em que esta camada não existe, o crescimento de bolor é bastante superior, sofrendo aumentos médios de aproximadamente 40%.

4.3.2.3. Orientação

Tal como no VTT atualizado, a orientação é o fator que menos influencia os resultados obtidos. A passagem da orientação de norte para sul tem, no entanto, maior influência nos valores do crescimento nos casos sem isolamento térmico, com reduções perto dos 100mm. Nos casos com isolamento térmico esta redução é quase insignificante, evidenciando a importância do isolamento térmico na estabilização das condições higrotérmicas interiores.

4.3.3. RESULTADOS COM 200 CLIMAS

4.3.3.1. Material de revestimento

Neste subcapítulo é feita a análise da distribuição dos valores máximos de crescimento considerando os 200 climas, realçando as diferenças que ocorrem entre materiais de revestimento. Nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 estão expostos os resultados referentes aos materiais reboco de gesso, MDF e madeira não tratada, respetivamente.

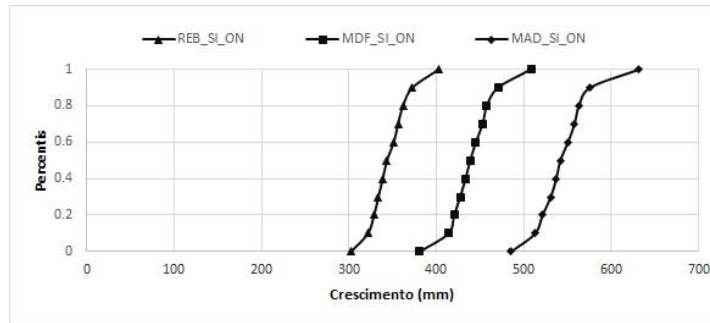


Fig. 4.12 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos sem isolamento e orientação norte variando o material.

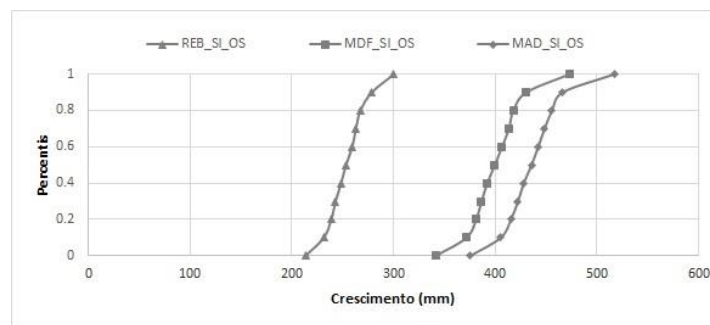


Fig. 4.13 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos sem isolamento e orientação sul variando o material.

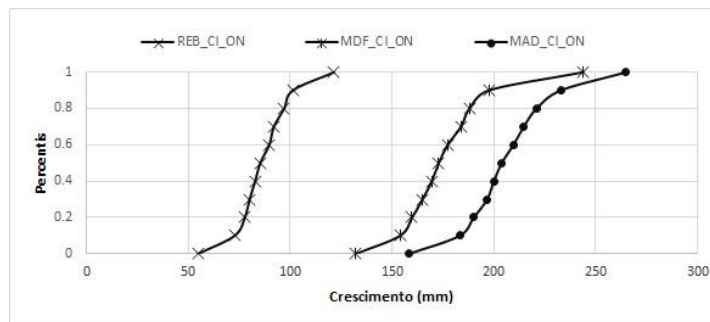


Fig. 4.14 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com isolamento e orientação norte variando o material.

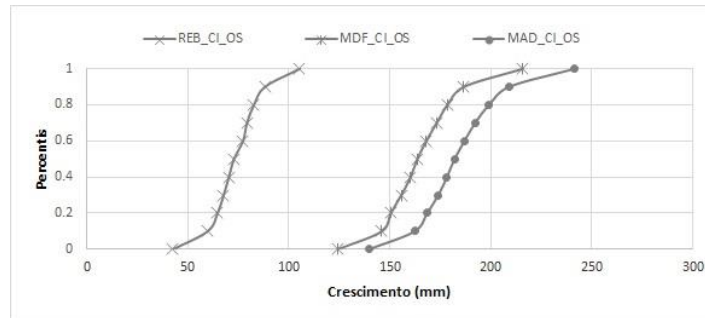


Fig. 4.15 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com isolamento e orientação sul variando o material.

Analisando as figuras é possível ver claramente que consoante o material escolhido, os valores de crescimento variam desde valores inferiores a 50mm, em casos de revestimento com reboco de gesso e com isolamento térmico, até valores superiores a 600mm, no caso de revestimento com madeira não tratada e sem isolamento térmico.

Utilizando como exemplo os casos com orientação a norte, para o revestimento com reboco de gesso é possível verificar que os valores variam entre cerca de 50mm e 130mm, para casos com isolamento térmico, e entre 210mm e 400mm, para casos sem isolamento. O revestimento em MDF apresenta um crescimento intermédio, nos casos com isolamento térmico com valores entre 125mm e 250mm e nos casos sem isolamento entre 350mm e 470mm. Por fim, para a madeira não tratada, embora pertencendo ao mesmo substrato do revestimento em MDF, os valores de crescimento são os mais elevados entre os três materiais, variando entre, aproximadamente, 150mm e 260mm para casos com isolamento e entre os 400mm e 620mm, para casos sem isolamento.

4.3.3.2. Existência de isolamento térmico

Apresentam-se dois gráficos, onde se evidencia o efeito da presença do isolamento térmico. A Figura 4.16 mostra a distribuição dos crescimentos máximos para os seis casos com orientação a norte e a Figura 4.17 para os seis casos com orientação a sul.

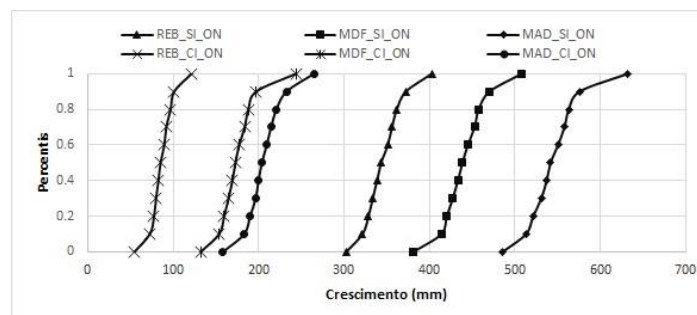


Fig. 4.16 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com orientação norte variando a existência de isolamento.

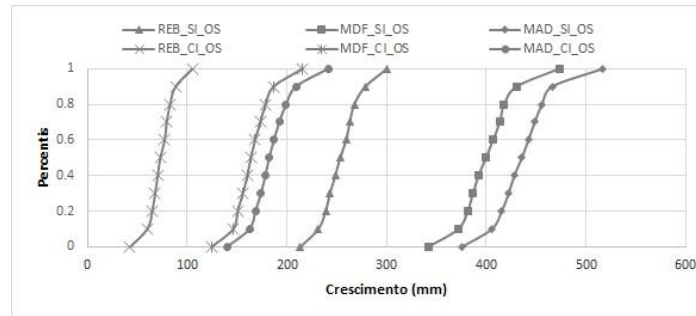


Fig. 4.17 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com orientação sul variando a existência de isolamento.

As três linhas mais à esquerda em ambos os gráficos são referentes a casos com isolamento térmico, sendo as restantes três para os casos sem isolamento. Assim sendo, tal como no modelo VTT atualizado, podemos concluir que a inclusão de uma camada isolante diminui significativamente o crescimento previsto. Outro facto importante é que o tipo de distribuição não é muito influenciado pela presença de isolamento térmico, ao contrário do que acontecia no modelo VTT atualizado. Usando como exemplo a madeira não tratada, que é o material mais propício a valores de crescimento mais elevados, verifica-se que, tanto para os casos com orientação norte como para sul, 80% dos valores máximos decrescem entre 250mm e 300mm. Para os restantes casos de estudo verifica-se uma redução semelhante.

4.3.3.3. Orientação

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram o efeito da orientação no valor do crescimento, separadamente para cenários com e sem isolamento térmico, respetivamente.

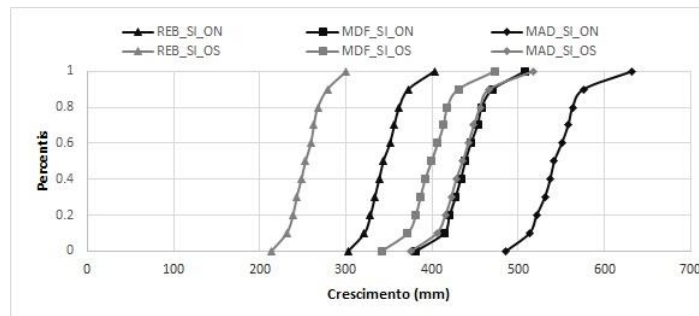


Fig. 4.18 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos sem isolamento variando a orientação.

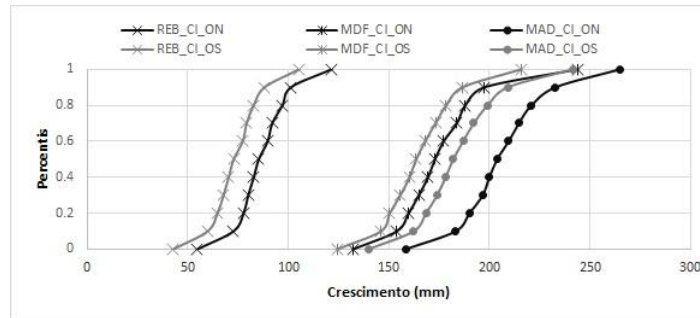


Fig. 4.19 – Distribuição dos valores máximos de crescimento para os casos com isolamento variando a orientação.

Como foi referido anteriormente e confirmando a conclusão tirada para o modelo VTT atualizado, a orientação é o fator que menos influencia o crescimento de bolores. Não deixa, no entanto, de ser um fator a considerar e que pode ser relevante em determinadas circunstâncias. A forma da distribuição dos valores do crescimento também não foi afetada pela orientação, variando apenas ligeiramente a ordem de grandeza.

Verifica-se que para casos em que não há uma camada isolante, a orientação origina reduções no crescimento na ordem das centenas de milímetros, tendo, no entanto, o seu papel reduzido quando introduzida uma camada isolante.

5

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS

5.1. COMPARAÇÃO DE VALORES MÁXIMOS OBTIDOS

Com todos os casos compilados é possível fazer uma comparação entre os resultados produzidos pelo modelo VTT atualizado e pelo modelo biohigrotérmico, de forma a analisar a convergência entre ambos. Uma primeira abordagem consiste na comparação entre o valor máximo de Mould Index e o crescimento máximo obtidos para cada clima interior. Esta análise permite avaliar uma possível tendência que mostre concordância entre os dois modelos e está traduzida na Figura 5.1.

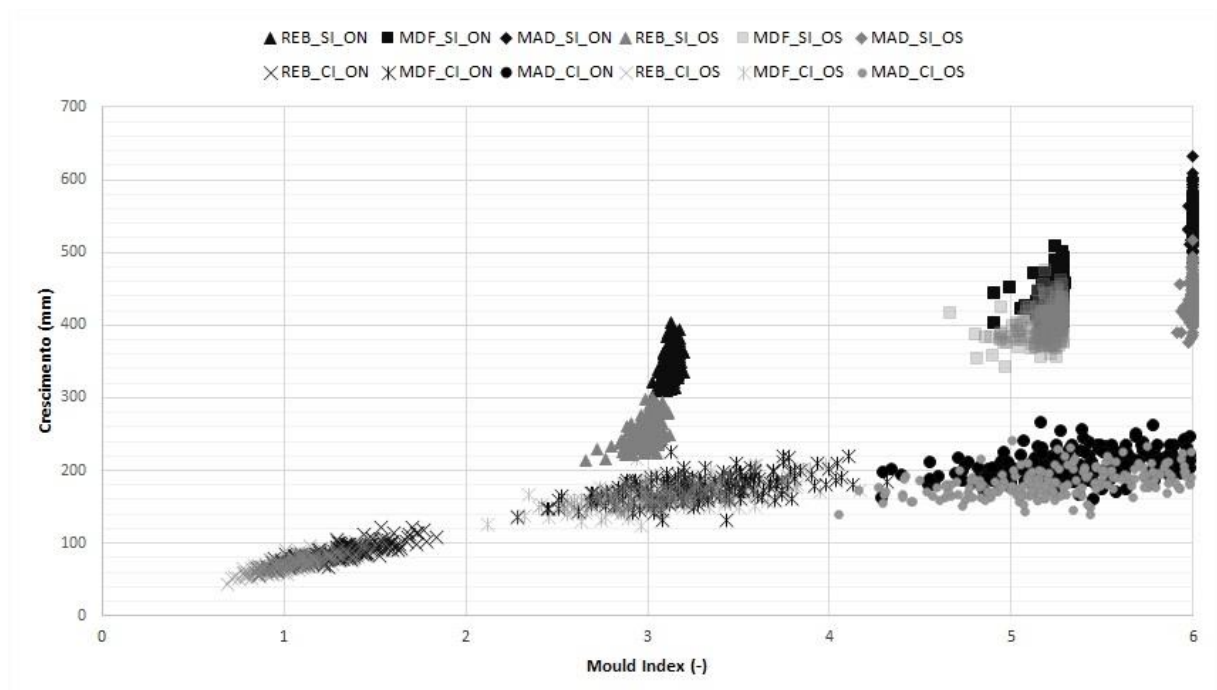


Fig. 5.1 – Correspondência dos resultados máximos de ambos os modelos para os 200 climas.

Estes resultados permitem desde logo concluir que não existe uma correlação linear entre os dois modelos, notando-se até uma tendência para divergirem à medida que o risco de desenvolvimento de bolores aumenta. Esta aparente divergência já foi evidenciada por outros autores como se descreve em detalhe mais à frente neste texto. Os resultados são, no entanto, coerentes, uma vez que a valores mais elevados do Mould Index correspondem a valores de crescimento também maiores.

As diferenças que resultam da aplicação de cada um dos modelos, relativamente à introdução de uma camada de isolamento térmico, são claramente evidenciadas na Figura 5.1. Nos casos em que não existe isolamento térmico (três grupos de pontos mais acima na Figura 5.1) a dispersão de resultados ocorre essencialmente no modelo biohigrotérmico (escala vertical), enquanto nos casos com isolamento (três grupos de pontos mais abaixo na Figura 5.1) a dispersão ocorre no modelo VTT atualizado. No modelo VTT atualizado os resultados para os casos sem isolamento térmico aparentam estar limitados superiormente, situação que se verificou estar relacionada com um critério de limitação imposto pelo modelo em função da classe do material.

Exemplo disso é o caso do revestimento em MDF, onde os valores do Mould Index nunca ultrapassam 5,3, devido às constantes definidas pelo modelo para esta classe de sensibilidade, de onde resulta um M máximo (eq. 2.6), definindo assim uma espécie de limite superior. Na Figura 5.2 está exposto um exemplo deste fenómeno no Modelo VTT atualizado, aplicado para condições constantes, com uma temperatura de 22°C e humidade relativa de 97%, sem aplicação do sistema de redução. Verifica-se, neste exemplo, que para a classe “sensível” (classe do revestimento em MDF) o limite superior seria 4,5, aproximadamente.

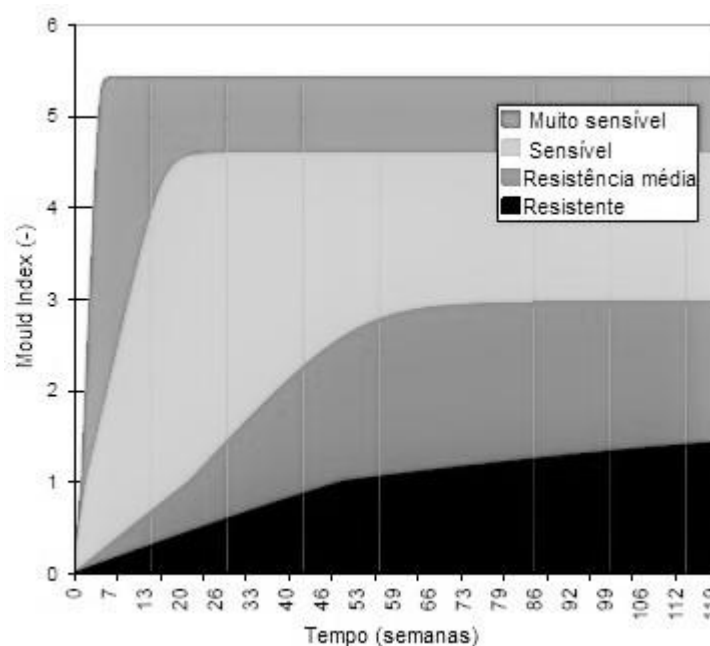


Fig. 5.2 – Mould Index previsto para as diferentes classes de sensibilidade para condições constantes de 22°C e humidade relativa de 97%. (adaptado de [31]).

Este fenómeno, no entanto, não se verifica nos casos com isolamento térmico, uma vez que quando é introduzida esta camada, as condições higrotérmicas da superfície interior melhoram significativamente e, portanto, os valores de Mould Index não atingem o limite máximo imposto pelo modelo (eq. 2.6).

Assim, esta limitação do modelo VTT atualizado explica a menor dispersão dos valores de Mould Index nos casos sem isolamento térmico. Efetivamente, esta menor dispersão é fictícia e ocorre apenas porque o Mould Index está limitado superiormente. Da mesma forma se pode concluir que, analisando os resultados dos casos com isolamento térmico, o modelo VTT atualizado é mais sensível às flutuações do clima interior.

A correlação entre os dois modelos já foi testada por Krus et al. [24]. Nesse trabalho foram efetuadas 350 simulações anuais, variando as condições higrotérmicas da superfície em análise (aplicando fatores de U entre 0,3 e 1,9), e propôs-se, inicialmente, uma correlação do tipo polinomial. Em função da geometria da curva, testou-se posteriormente uma curva de regressão baseada na curva higroscópica do tipo BET, tendo-se obtido um resultado ainda mais interessante.

Neste trabalho, avaliou-se a correlação entre os dois modelos através de duas linhas de tendência, uma exponencial e uma polinomial de terceiro grau, tendo-se obtido um R^2 de 0,655 e 0,5879, respetivamente. Na Figura 5.3 estão representados os resultados de ambos os modelos para os 200 climas interiores e para os 12 casos de estudo, juntamente com as três linhas de tendência.

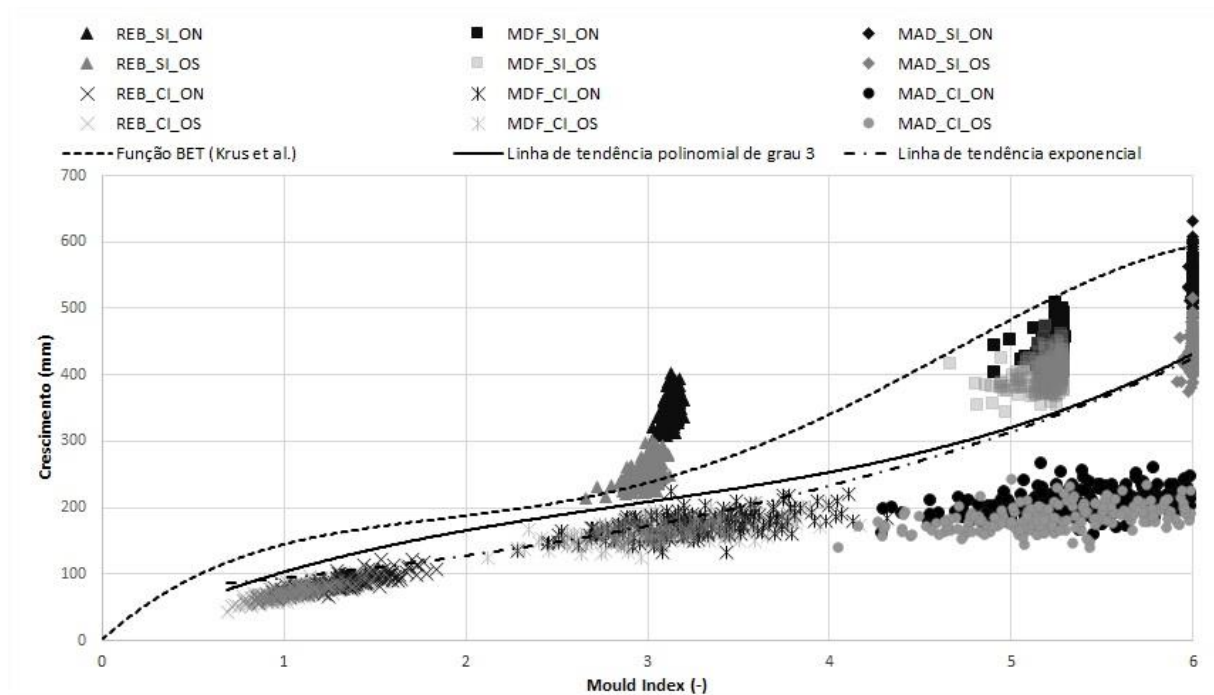


Fig. 5.3 - Correspondência dos resultados máximos de ambos os modelos para os 200 climas, juntamente com as linhas de tendência obtidas e a linha de tendência estabelecida por Krus et al. [24].

$$\begin{cases} \text{Crescimento} = 3.514 \times M^3 - 30.794 \times M^2 + 130.27 \times M, \text{Linha de tendência polinomial} \\ \text{Crescimento} = 69.857e^{0.3009 \times M}, \text{Linha de tendência exponencial} \end{cases} \quad (5.1)$$

É possível notar que existem diferenças entre as linhas obtidas com os resultados simulados para estes casos e a proposta por Krus et al. [24]. Verifica-se que para valores mais altos de Mould Index, a função BET definida por Krus et al. conduz a um maior crescimento (mm). Esta linha aproxima bastante bem os resultados obtidos neste trabalho para os casos sem isolamento, afastando-se nos casos com isolamento. Mais conclusões acerca do pior ajuste da função BET aos resultados obtidos neste trabalho em contraponto com bom ajuste obtido por Krus, só seriam possíveis avaliando com cuidado os cenários testados por este autor.

As linhas de tendência que foram obtidas neste trabalho (polinomial de grau 3 e exponencial), para os mesmos valores de Mould Index, apresentam um crescimento inferior ao da função BET. Esta diferença

entre as linhas de tendência e a função BET nos valores mais elevados de Mould Index pode, em parte, ser explicada pelo elevado número de ocorrências com Mould Index igual a 6, que pode sobrestimar o peso destes pontos.

Para os menores valores de Mould Index, confirma-se que o modelo biohigrotérmico vai prever os resultados com excesso, quando comparado com o modelo VTT atualizado, isto porque não são consideradas as reduções para condições não favoráveis impostas por este último [24].

Os R^2 obtidos são os coeficientes de determinação das linhas de tendência. Estes expressam a confiança que se pode ter na reta obtida. O seu valor pode ser interpretado em termos de percentagem, indicando a percentagem na variância, neste caso do crescimento, que é explicada pela variância de Mould Index. Desta forma, e fazendo uma análise aos resultados obtidos, podemos deduzir que a reta exponencial será aquela que irá apresentar uma correlação de ambas as escalas mais aproximada.

5.2. INSTANTE EM QUE OCORRE O VALOR MÁXIMO

De modo a alargar o âmbito da comparação entre os dois modelos, foram avaliados os instantes horários em que ocorrem os máximos, para todos os casos de estudo e para os 200 climas interiores. Esta informação pode ser importante para explicar algumas divergências entre os resultados produzidos pelos dois modelos.

Os gráficos das Figuras 5.4 e 5.5 expõem os instantes em que ocorrem os valores máximos consoante o caso e o clima aplicado, tanto para o modelo VTT atualizado, como para o modelo biohigrotérmico, respetivamente.

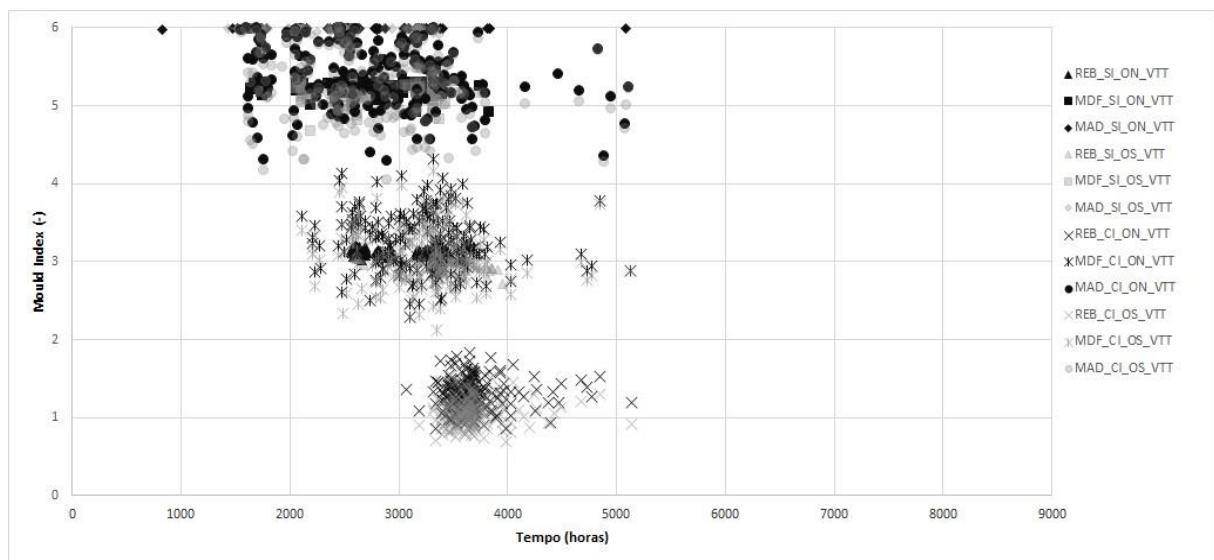


Fig. 5.4 – Instantes em que ocorrem os valores máximos de Mould Index de acordo com o modelo VTT atualizado.

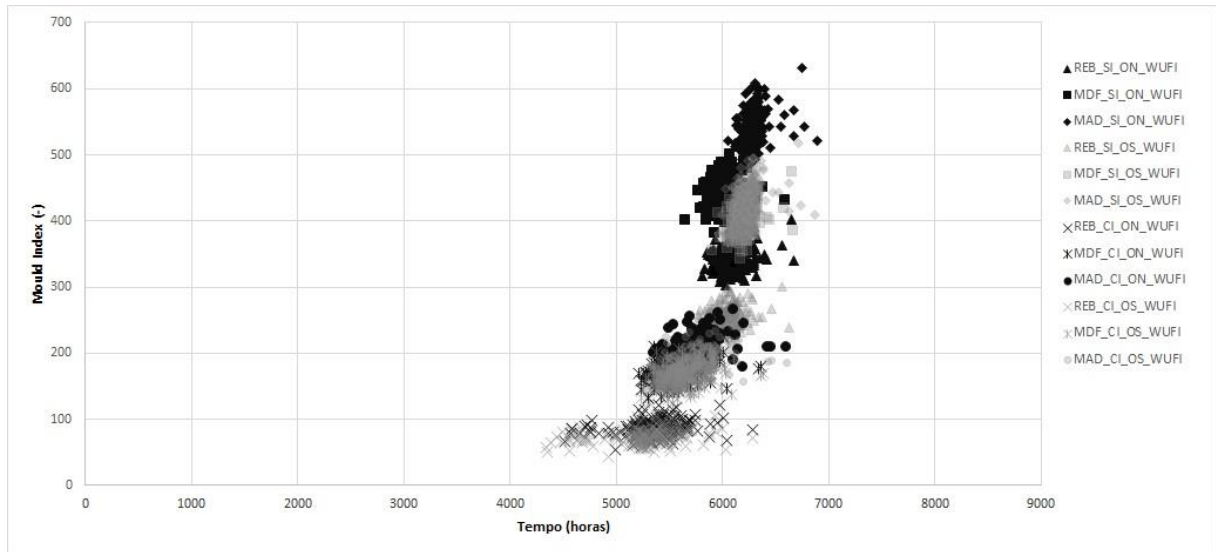


Fig. 5.5 – Instantes em que ocorrem os máximos valores do crescimento de acordo com o modelo biohigrotérmico.

Analisando as figuras, é evidente que, consoante o modelo, os instantes em que ocorrem os valores máximos são substancialmente diferentes. Enquanto para o modelo VTT atualizado esses instantes estão maioritariamente compreendidos no intervalo entre as 2000 e as 4000 horas, para o modelo biohigrotérmico verifica-se que esses instantes só ocorrem mais tarde, no intervalo entre as 5000 e as 6500 horas e sobretudo por volta das 6000 horas. A principal razão para esta diferença prende-se com o facto de, não havendo um sistema de redução do crescimento devido a condições não favoráveis, como acontece no modelo VTT, o modelo biohigrotérmico continuar a prever aumentos no crescimento, o que leva a que o valor máximo seja atingido mais tarde. Ou seja, no período em que ocorre redução do Mould Index, o crescimento no modelo biohigrotérmico mantém-se constante e, portanto, o crescimento é acumulado até se atingir o seu máximo no último instante em que ocorreram condições favoráveis ao desenvolvimento de bolores.

Importa, no entanto, referir que estes resultados são, obviamente, condicionados pela escolha do período de análise. Assim, no caso do modelo VTT atualizado os máximos ocorrem sempre imediatamente antes do início do período do ano mais quente (ou seja no final do período crítico para o desenvolvimento de bolores). Neste caso, esse período corresponde aproximadamente às 4000 horas, período este referente a meados do mês de maio. Já no modelo biohigrotérmico os máximos ocorrerem no período entre as 5000 e as 6500 horas, correspondendo mais ou menos ao início dos meses de Julho e Setembro.

Para avaliar se a escolha dos materiais de revestimento, da presença da camada de isolamento térmico e da orientação têm influência no instante em que ocorre o máximo, foram isolados os resultados obtidos em cada modelo para facilitar a sua interpretação. Obtiveram-se assim, para o modelo VTT atualizado as Figuras 5.6 e 5.7 e para o modelo biohigrotérmico as Figuras 5.8 e 5.9.

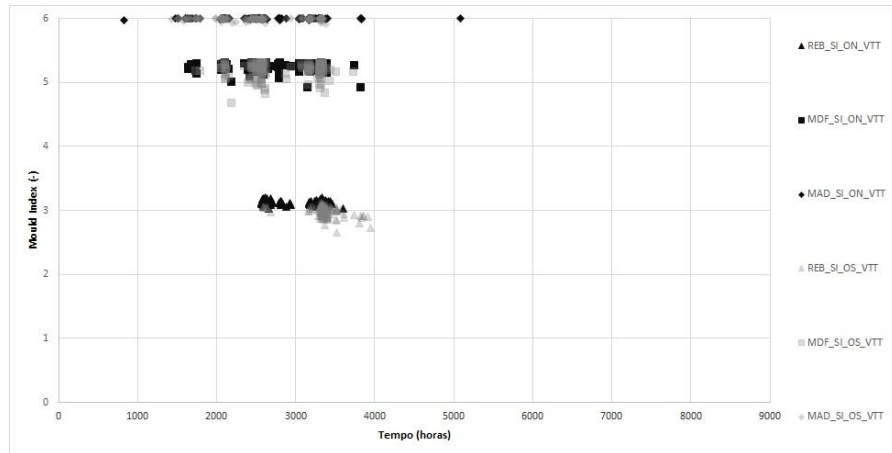


Fig. 5.6 – Instantes em que ocorrem os valores máximos de Mould Index para os casos sem isolamento térmico.

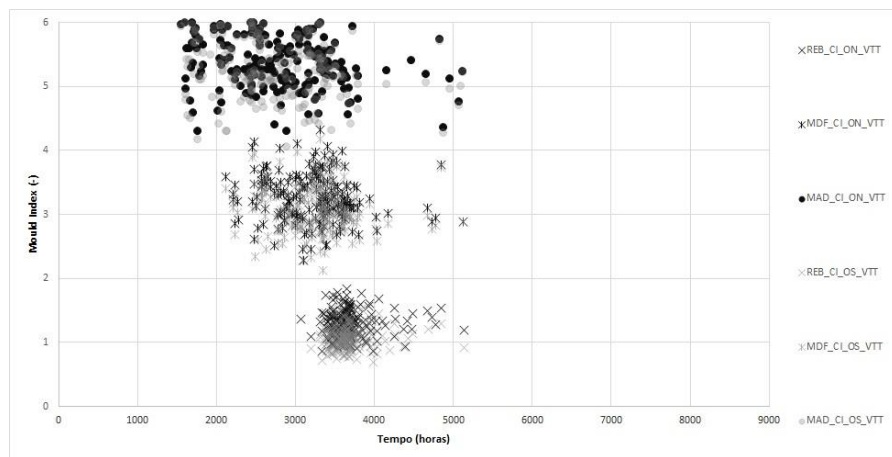


Fig. 5.7 – Instantes em que ocorrem os valores máximos de Mould Index para os casos com isolamento.

Analisando as figuras 5.6 e 5.7 verifica-se que a dispersão dos valores ao longo do tempo varia consoante o material de revestimento escolhido, independentemente da presença da camada de isolamento térmico. No caso da madeira não tratada os instantes em que ocorrem os valores máximos de Mould Index têm uma maior dispersão do que os obtidos para o revestimento em MDF ou pelo reboco de gesso, sendo que este último apresenta os resultados mais homogêneos (menor variação no tempo). Também se verifica que os valores máximos ocorrem primeiro na madeira não tratada, seguindo-se o revestimento em MDF e finalmente o reboco de gesso. Quanto aos efeitos que a orientação e a existência de isolamento térmico têm nos resultados obtidos, verifica-se que quando se altera a orientação de norte para sul e se aplica isolamento térmico, os máximos diminuem e ocorrem mais tarde, sendo que o impacto da introdução do isolamento térmico é bastante mais significativo.

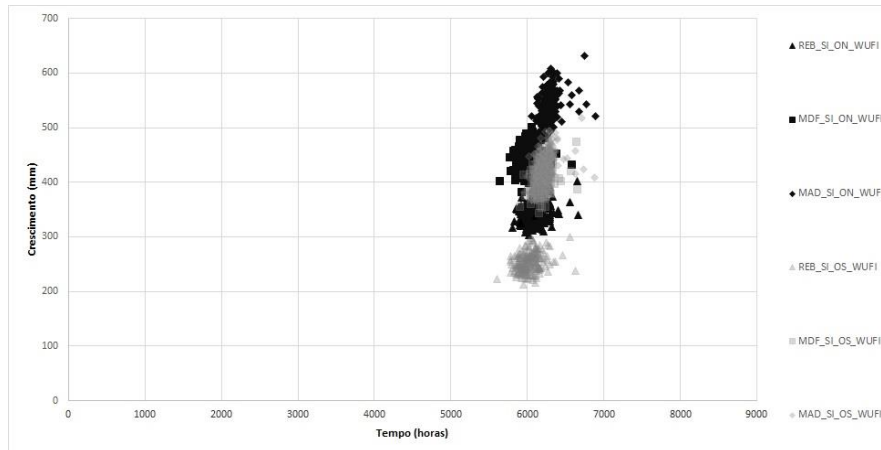


Fig. 5.8 – Instantes em que ocorrem os valores máximos do crescimento para os casos sem isolamento.

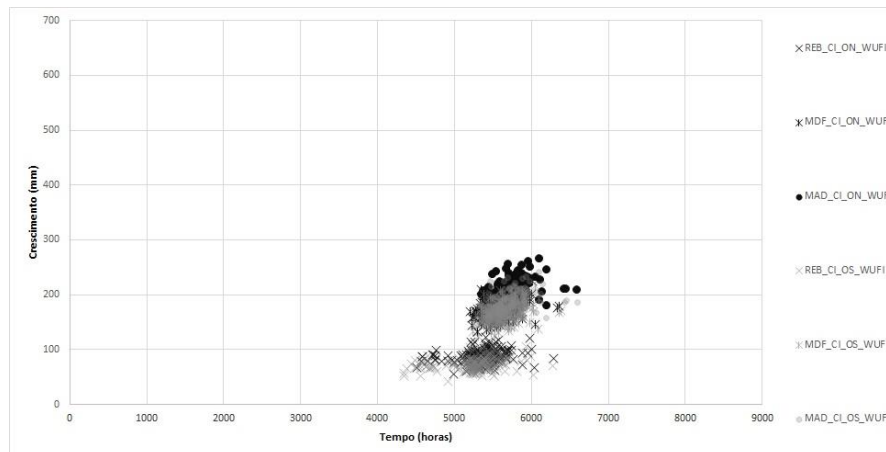


Fig. 5.9 – Instantes em que ocorrem os valores máximos do crescimento para os casos com isolamento.

Em relação ao modelo biohigrotérmico (figuras 5.8 e 5.9), conclui-se que, contrariamente ao verificado no modelo VTT, não se observa grande dispersão ao longo do tempo dos instantes em que ocorrem os valores máximos do crescimento em função do material de revestimento. Adicionalmente, verifica-se uma inversão da ordem com que ocorrem os máximos, especialmente nos cenários com isolamento térmico. Assim, o reboco de gesso passa a ser o material que apresenta os valores máximos mais cedo, seguindo-se o revestimento em MDF e finalmente a madeira não tratada.

Quando se avaliam os resultados consoante a orientação, verifica-se que os valores máximos para os casos com orientação sul ocorrem um pouco mais tarde, tal como acontece no modelo VTT atualizado.

A aplicação de isolamento térmico, tal como no modelo VTT atualizado, conduz a uma dispersão dos resultados. Nos casos com isolamento térmico os instantes para os quais ocorrem os máximos são bastante dispersos, variando entre as 4500 e as 6500 horas, enquanto para os casos sem isolamento, os instantes em que ocorrem os máximos estão entre as 6000 e as 6500 horas.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A previsão de desenvolvimento de bolors é cada vez mais importante para garantir um ambiente saudável nos edifícios. A decisão da constituição das fachadas torna-se portanto um aspeto chave para evitar a proliferação do bolor.

Com o intuito de analisar o efeito do clima interior no desenvolvimento de bolors, verificou-se a influência de três fatores chave: o material de revestimento, a orientação e a existência de uma camada de isolamento térmico, na sensibilidade de dois modelos, o modelo VTT atualizado e o modelo biohigrotérmico.

Concluiu-se que:

- Humidades relativas altas são os principais agentes do desenvolvimento de bolor.
- O desenvolvimento de bolors não se deve apenas ao clima exterior, o clima interior irá ter um peso tão grande ou até maior que este, uma vez que este pode ser manipulado mais facilmente
- A existência de flutuações acentuadas de temperatura (°C) e humidade relativa ao longo do tempo potenciam o desenvolvimento de bolors.
- O material de revestimento aplicado é o principal fator responsável pelo controlo no crescimento de bolors, que juntamente com a introdução de uma camada de isolamento pode impedir que este atinja valores inadmissíveis.
- A orientação será o fator com menor carácter decisivo. Alterando do caso mais gravoso (norte) para o menos gravoso (sul), verifica-se que a ordem de redução é demasiado baixa. No entanto deverá ser sempre um fator a ter em conta na elaboração de disposições construtivas.

Em relação aos modelos analisados no presente trabalho, também se puderam retirar algumas conclusões.

- É possível fazer a comparação de ambos os modelos, de forma a estabelecer uma equiparação das escalas adotadas por estes;
- No modelo VTT atualizado, quanto menos suscetível ao crescimento for um material de revestimento, mais tarde atingirá o máximo crescimento, verificando-se exatamente o contrário para o modelo biohigrotérmico;
- A ausência de isolamento provoca uma variabilidade dos resultados no modelo biohigrotérmico, estabilizando com a introdução deste;
- A introdução de isolamento causa o efeito contrário no modelo VTT atualizado, aumentando a dispersão dos valores máximos que este pode prever.

A comparação entre estes dois modelos é fundamental, uma vez que nos pode dar uma noção da variabilidade que os valores de crescimento de bolor podem obter. Assim a comparação direta entre eles torna-se especialmente importante e necessária, estabelecendo para isso funções de transformação, como aquela proposta por Krus et al. [24] e as obtidas neste trabalho.

6.2. PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO

O desenvolvimento de bolores é um fenómeno com grande impacto na qualidade de ar interior, assim como na saúde do ser humano. Além destes fatores, também podemos considerar que este tem um impacto tanto social como económico, o que reforça os esforços que devem ser tomados de forma a evitá-lo.

Tantos os modelos mais simples, como os complexos fazem uma simplificação dos complexos processos de desenvolvimento de bolor, portanto é aconselhado cuidado na leitura dos resultados. Assim, devido às simplificações e suposições de cada modelo, diferentes conclusões podem ser tiradas de ambos os modelos.

Estes modelos são determinísticos e como tal fazem uma previsão de acordo com resultados obtidos previamente em ensaios laboratoriais, deste modo não são considerados fatores como a variabilidade das propriedades dos materiais, carga de humidade e até mesmo erros devido à introdução da mão humana. Todos estes fatores podem levar ao desenvolvimento de bolor ainda que os modelos não o prevejam.

Deste modo e, para complementar este trabalho, deveria ser feita uma abordagem mais prática para a verificação da aproximação dos resultados previstos àqueles realmente obtidos para condições iguais. A análise a um maior espectro de materiais que possam estar dentro das mesmas classes de sensibilidade e substrato é também uma possibilidade, de forma a obter diferentes resultados dentro de uma mesma classe.

Por fim, sugere-se a aplicação desta metodologia ao clima exterior de várias cidades portuguesas permitindo assim criar mapas de risco associados às várias disposições construtivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. J. Moon, "Assessing Mold Risks in Buildings under Uncertainty," *Georgia Institute of Technology*, 2005.
- [2] K. Sedlbauer, "Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components.," 2001.
- [3] C. A. Robbins, L. J. Swenson, M. L. Nealley, B. J. Kelman, and R. E. Gots, "Health effects of mycotoxins in indoor air: a critical review," *Applied occupational and environmental hygiene*, vol. 15, pp. 773-784, 2000.
- [4] B. K. Harriman, "Humidity Control Design Guide," p. 512, 2001.
- [5] O. Adan, "On the fungal defacement of interior finishes," *Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven*, p. 224 p., 1994.
- [6] H. Viitanen, J. Vinha, K. Salminen, T. Ojanen, R. Peuhkuri, L. Paajanen, *et al.*, "Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures," *Journal of Building Physics*, vol. 33, pp. 201-224, 2010.
- [7] T. Ojanen *et al.*, "Classification of material sensitivity e new approach for mould growth modeling.," *9th Nordic symposium on building physics*, vol. 2, 2011.
- [8] H. L. S. C. Hens, "Fungal defacement in buildings: a performance related approach," *HVAC and R Research*, vol. 5, pp. 265-279, 1999.
- [9] M. Krus, K. Sedlbauer, W. Zillig, and H. M. Künzle, "A New Model for Mould Prediction and its Application on a Test Roof," 2001.
- [10] C. Y. Rao, H. A. Burge, and J. C. S. Chang, "Review of Quantitative Standards and Guidelines for Fungi in Indoor Air," *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 46, pp. 899-908, 1996.
- [11] Ministérios do Ambiente, Ordenamento do território e energia, da Saúde e da solidariedade, Emprego e Segurança social, 2013 "*Portaria nº 353-A/2013 de 4 de Dezembro*".
- [12] A. Hukka and H. A. Viitanen, "A mathematical model of mould growth on wooden material," *Wood Science and Technology*, vol. 33, pp. 475-485, 1999.
- [13] E. Vereecken, D. Saelens, and S. Roels., "A Comparison of different mould prediction models," 2011.
- [14] M. Krus, R. Kilian, and K. Sedlbauer, "Mould growth prediction by computational simulation on historic buildings," 2007.
- [15] K. Sedlbauer and M. Krus, "Method for predicting the formation of mould fungi," ed: Google Patents, 2003.
- [16] H. Hens, "IEA annex 14: condensation and energy," *Journal of Building Physics*, vol. 15, pp. 261-273, 1992.
- [17] S. Johansson, L. Wadsö, and K. Sandin, "Estimation of mould growth levels on rendered façades based on surface relative humidity and surface temperature measurements," *Building and Environment*, vol. 45, pp. 1153-1160, 2010.
- [18] G. Ayerst, "The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi," *Journal of Stored Products Research*, vol. 5, pp. 127-141, 1969.
- [19] S. L. Smith and S. Hill, "Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *A. versicolor*," *Transactions of the British Mycological Society*, vol. 79, pp. 558-560, 1982.
- [20] J. Clarke, C. Johnstone, N. Kelly, R. McLean, N. Rowan, and J. Smith, "A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings," *Building and Environment*, vol. 34, pp. 515-521, 1999.
- [21] H. Hens, "Fungal defacement in buildings: A performance related approach," *HVAC&R Research*, vol. 5, pp. 265-280, 1999.

- [22] H. Hens, "Mold in dwellings: field studies in a moderate climate," in *Proceedings of the 24th AIVC Conference and BETEC Conference, Ventilation, Humidity Control and Energy*, 2003, pp. 12-14.
- [23] J. Viitanen and T. Ojanen, "Improved model to predict mold growth in building materials. Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings," 2007.
- [24] M. Krus, M. Seidler, and K. Sedlbauer, "Comparative evaluation of the predictions of two established mold growth models," in *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings - 11th International Conference*, 2010.
- [25] T. Ojanen, H. Viitanen, Peuhkuri, K. R. Lähdesmäki, J. Vinha, and K. Salminen, "Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials," in *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings - 11th International Conference*, 2010.
- [26] E. Vereecken and S. Roels, "Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation," *Building and Environment*, vol. 51, pp. 296-310, 2012.
- [27] R. Almeida, N. Ramos; S. Manuel, "Influence of input data uncertainty in school buildings energy simulation," *10th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Lund, Sweden, 15-19 June.*, 2014.
- [28] R. M. S. F. Almeida, S. Manuel, and N. M. M. Ramos, "Towards a methodology to include building energy simulation uncertainty in the life cycle cost analysis of rehabilitation alternatives," *Journal of Building Engineering* vol. Vol. 2, pp. 44-51, 2015.
- [29] A. Silva and A. M. Rodrigues, "A Incorporação da Incerteza na Análise Térmica de Edifícios," *Congresso Construção 2012*, 2012.
- [30] P. Fonte, "Aplicação do Método de Monte Carlo em Simulações Higrotérmicas de Edifícios.," 2011.
- [31] H. Viitanen, T. Ojanen, R. Peuhkuri, J. Vinha, K. Lähdesmäki, and K. Salminen, "Mould growth modelling to evaluate durability of materials," in *12th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Conference Proceedings*, 2011, pp. 409-416.